JIM BAGGOTT
ORIGINI
POVESTEA ȘTIINȚIFICĂ A CREAȚIEI
HUMANITAS

Jim Baggott (n. 1957) a studiat la Universitatea din Manchester, a obținut titlul de doctor în chimie fizică la Universitatea Oxford și a predat la Universitatea din Reading. A publicat cărți de știință și filosofie a științei, între care The Meaning of Quantum Theory, Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory, The Quantum Story: A History în 40 Moments, Higgs: The Invention and Discovery of the 'God Particle' (Higgs. Inventarea și descoperirea „Particulei lui Dumnezeu", Humanitas, 2016), Farewell to Reality: How Fairy–tale Physics Betrays the Search for Scientific Truth. A fost distins cu Medalia Marlow a Societății Regale de Chimie și cu Premiul Glaxo al Asociației Britanice a Autorilor de Știință.

Jim Baggott
Origini povestea științifică a creației

Pentru Grace (7 ani),

care vrea să devină geofizician

Mulțumiri

Acesta a fost un proiect extrem de ambițios, pe care nu l-aș fi putut duce la bun sfârșit fără sprijinul Lathei Menon, editoarea mea de la Oxford University Press. Îi rămân veșnic îndatorat. Recunoștința mea se îndreaptă de asemenea către Emma Ma, Jenny Nugee și Kate Gilks de la OUP, precum și către Frances Topp și Paul Beversey, care m–au ajutat enorm să transform cuvintele și imaginile mele în cartea pe care o aveți în față. Mă îndoiesc că ea ar fi fost ceea ce este dacă n-ar fi existat John Gribbin, a cărui carte *Genesis,* publicată în 1981, mi-a fost sursă de inspirație (și mărturisesc că am blestemat citind–o, fiindcă mi-am dat seama că tare mult mi-ar fi plăcut ca eu să fi fost cel care a scris–o).

Nimic nu mă face mai fericit decât să aflu ceva nou. Scrierea acestei cărți m–a purtat pe unele teritorii familiare, despre care am mai scris, dar anvergura ei m–a atras și în unele zone mai puțin cunoscute. Le sunt așadar recunoscător tuturor specialiștilor care și-au rupt din timpul lor prețios pentru a citi secțiuni din manuscris și mi-au oferit

sfaturi și critici utile. Printre ei se numără Jennifer Clack de la Universitatea Cambridge; George Ellis de la Universitatea din Cape Town; Andrew Knoll de la Universitatea Harvard; Jeremiah Ostriker de la Universitatea Princeton; Michael Russell de la Laboratorul de Propulsie din Pasadena, California; Chris Stringer de la Muzeul de Istorie Naturală din Londra; Ian Tattersall de la Muzeul American de Istorie Naturală din New York; Steven Weinberg de la Universitatea Statului Texas din Austin; Simon White de la Institutul Max Planck pentru Astrofizică din Garching, Germania. De vină pentru eventualele erori sau neînțelegeri sunt, desigur, numai eu.

După cum știți prea bine, fericirea nu înseamnă numai să studiezi lucruri și să scrii despre ele. Ea ți–e dată și de prezența unor oameni frumoși în jurul tău. Mulțumesc lui Madeleine, Jur, Guido și Mikael, care au creat două spații minunate în care am putut scrie o parte din această carte, și soției mele Jini pentru tot restul.

Jim Baggott,

iunie 2015

Lista ilustrațiilor

1. Relativitatea specială și inexistența simultaneității absolute

2. Sonda Gravity B (Arhiva media a sondei Gravity Probe B, Universitatea Stanford)

3. Expansiunea universului de la big bang până în prezent (Agenția Spațială Europeană)

4. Evoluția celor patru forțe din natură (GSFC/NASA)

5. Universuri Friedmann cu diferite curburi spațio–temporale

6. Interferența constructivă și interferența destructivă a undelor

7. Interferența conform teoriei ondulatorii a luminii

8. Franje de interferență produse de electroni (cu permisiunea dr. Tonomura)

9. Linii de forță magnetice (Phil Degginger/Alamy)

10. Interacţiunea a doi electroni implicând schimbul unui foton virtual

11. Modelul standard din fizica particulelor

12. Diferenţa de comportament între forţa electromagnetică dintre două particule încărcate electric şi forţa tare de culoare care menţine cuarcii legaţi

13. Reacţiile nucleare importante din nucleosinteza primară

14. Curbele de radianţă ale corpului negru la diferite temperaturi

15. Antena pentru detectarea microundelor de la Laboratorele Bell (Colecţia Everett/Mary Evans Picture Library)

16. Anizotropia în distribuţia materiei şi crearea structurii la scară mare a universului

17. Deplasarea unui „pachet de unde" dând impresia de traiectorie a unei particule. Pe baza unei ilustraţii din *Molecular Quantum Mechanics* de Atkins şi Friedman (Oxford: Oxford University Press, 2010)

18. „Variaţia dipolară" produsă de mişcarea galaxiei Calea Lactee (NASA/Science Photo Library)

19. Radianţa corpului negru pentru radiaţia cosmică de fond, măsurată de satelitul COBE

20. Variaţiile de temperatură ale radiaţiei cosmice de fond pe întregul firmament, pe baza datelor furnizate de sateliţii COBE, WMAP şi Planck (20(a): NASA/ Science Photo Library. 20(b): Stocktrek Images, Inc./Alamy. 20(c): NASA/Agenţia Spaţială Europeană. 20(d): NASA/Science Photo Library. 20(e): WMAP Science Team/NASA/Science Photo Library. 20(f): Planck Collaboration/Agenţia Spaţială Europeană/Science Photo Library)

21. Variaţiile fluctuaţiilor de temperatură în funcţie de scara unghiulară, deduse din măsurătorile radiaţiei cosmice de fond făcute de satelitul Planck, în comparaţie cu predicţiile modelului Λ–CDM (Colaborarea Planck/Agenţia Spaţială Europeană)

22. Halourile de materie întunecată se contopesc, formând un „arbore de fuziune" (Cu permisiunea Oxford University Press, în numele

Societății Astronomice Regale)

23. Curbele Jeans pentru nori cu diferite mase de atomi de hidrogen, indicând temperaturile sub care norii colapsează și formează stele

24. Lanțul de reacții nucleare implicat în etapele inițiale ale nucleosintezei

25. Formarea primelor cinci elemente din tabelul periodic

26. Ciclul CNO

27. Diagrama Hertzsprung–Russell (Richard Powell)

28. Exemple de unde staționare

29. Orbitali ai atomilor de hidrogen de cea mai joasă energie

30. Absorbția și emisia luminii provenită din stele și nebuloase (30(a): Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) și Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team /NASA. 30(b): Carlos Clarivan/ Science Photo Library)

31. Deplasarea spre roșu a liniilor de absorbție (Carlos Clarivan/ Science Photo Library)

32. Efectul expansiunii asupra distanțelor și vitezelor galaxiilor învecinate

33. Deplasarea galactică spre roșu măsurată în studiul 2dF, dezvăluind structura la scară mare a universului vizibil (Willem Schaap, Wikimedia Commons)

34. Clasificarea galaxiilor conform lui Hubble (arxiv: astro–ph/98o9131, Cornell University)

35. Curbele de rotație ale galaxiilor oferă dovezi pentru existența halourilor de materie întunecată (Tony and Daphné Hallas/Science Photo Library)

36. Simularea pe calculator a formării unei galaxii spirale de tipul Căii Lactee (Copyright © 2015: Fabio Governato, Universitatea din Washington)

37. Calea Lactee văzută de deasupra planului galactic (R. Hurt/ESO/JPL–Caltech/NASA)

38. Abundența relativă a elementelor chimice din Soare (CC–BY–SA–3.o Wikimedia Commons)

39. Orbitalii de legătură și antilegătură ai moleculelor de hidrogen

40. Orbitalii hibrizi sp^3 ai metanului

41. Norul molecular Barnard 68 (European Southern Observatory)

42. Dependența evoluției universului de densitatea materiei și energiei întunecate (BenRG)

43. „Stâlpii Creației" (STScl/ESA/NASA)

44. Incluziuni bogate în calciu și aluminiu din meteoriții condritici (Sasha Krot)

45. Izotopii de aluminiu pot fi folosiți pentru a deduce evoluția Soarelui și a sistemului solar la începuturile lor

46. Ipoteza nebulară a lui Kant și Laplace (Cu permisiunea Oxford University Press, în numele Societății Astronomice Regale)

47. Evoluția stelară de la norul molecular la șirul principal (47(a): cu permisiunea Princeton University Press. 47(b): NASA/ESA/STSCI/J. Morse/ Science Photo Library)

48. Hayashi–Heney pentru o gamă de mase stelare (Patrick87/cu permisiunea lui Steven W. Stabler și Francesco Palla, „The Formation of Stars"/Wikimedia Commons)

49. Sistemul exoplanetar Kepler–62 (JPL–Caltech/Ames/NASA)

50. Discul protoplanetar din jurul unei stele tinere (ESO/NAOJ/NRAO/ ALMA)

51. Densitatea Pământului crește odată cu adâncimea și prezintă o serie de discontinuități (51(a): 52. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RadialdensityPREM.jpg)

52. Compoziția mantalei superioare, a scoarței oceanice și a scoarței continentale (52(b): Michael Szoenyi/Science Photo Library. 52(c): Trevor Clifford Photography. 52(d): Olegsam/Shutterstock)

53. Simularea pe calculator a impactului care a dus la formarea Lunii (Robin Canup)

54. Fața apropiată și fața îndepărtată a Lunii (GSFC/NASA)

55. Simulări pe calculator ale migrației planetare și a Ultimului Mare Bombardament (R. Gomes, H.F. Levison, K. Tsiganis și A. Morbidelli, *Nature,* 435, 466 (2005), figura 2, Nature Publishing Group)

56. Orbitele planetare actuale și legea Titus–Bode

57. Structura plăcilor tectonice ale Pământului (John Watson/USGS)

58. Principalii 20 de aminoacizi implicați în sistemele biochimice

59. Formele în oglindă ale aminoacidului alanină

60. Structura nucleotidelor implicate în structura AM și AND

61. Izvorul hidrotermal alcalin Orașul Pierdut (D. Kelley, Universitatea din Washington și NDSF–DSV Alvin; © WHOI; NSF)

62. Reprezentarea nucleotidelor într-o secvență scurtă de AM

63. Legăturile de hidrogen dintre perechile de baze complementare

64. O secvență de AM își catalizează propria replicare

65. Codul genetic

66. Secvența de baze din AM codifică anumiți aminoacizi care se combină pentru a forma proteine

67. Structura de dublu helix a ADN-ului (Astrophysics and Astrochemistry Laboratory/NASA)

68. „Schema–Z” a fotosintezei

69. Structurile găsite în chertul din Warrawoona se consideră a fi rămășițele fosilizate ale unora dintre primele organisme microscopice

(Reprodus cu permisiunea American Association for the Advancement of Science)

70. Scara timpului geologic al Pământului împărţită în patru eoni

71. Primul „arbore filogenetic al vieţii”, prezentând domeniile Bacteria şi Archaea. Cu permisiunea lui Otto Kandler, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 87 (1990)

72. Dovezile Marii Oxidări (72(a)(imagine): Dirk Wiersma/Science Photo Library. 72(a) (desen): H.D. Holland, „The Oxygenation of the atmosphere and oceans”, *Phil. Trans. R. Soc. B* 2006 361, doi: 10.1098/rstb.2006.1838, publicat pe 29 iunie 2006, figurile 1 şi 3, Philosophical Transactions B, The Royal Society. 72(b): H.D. Holland, „The Oxygenation of the atmosphere and oceans”, *Phil. Trans. R. Soc. B* 2006 361, doi: 10.1098/rstb.2006. 1838, publicat pe 29 iunie 2006, figurile 1 şi 3, Philosophical Transactions B, The Royal Society)

73. Comparaţie între celulele procariote şi cele eucariote (Princeton University Press)

74. Fosile de *Grypania spiralis* (Xvazquez)

75. Invenţii evolutive, organisme fosile selecate şi evenimente geologice din Proterozoic (Harta Rodiniei bazată pe o reconstrucţie efectuată de Naţional Science Foundation)

76. *Fractofusus misrai,* o fosilă din Ediacaran de la Mistaken Point, Newfoundiand, Canada (fotografie de Latha Menon)

77. Specimen fosil de *Dickinsonia costata* găsit la Ediacara Hills, în sudul Australiei (Verisimilus, Wikimedia Commons)

78. Întregul arbore filogenetic al vieţii, incluzând domeniul Eukaria. Cu permisiunea lui Otto Kandler, *Proceedings of the Naţional Academy of Sciences,* 87 (1990)

79. Trilobiţi fosili din Cambrianul mijlociu (79(a): Wilson 44691, Wikimedia Commons. 79(b): Sam Gon III. 79(c): Richie Kurk)

80. Exemple de animale marine fosile descoperite în şisturile din Burgess. (80(ai): Smithsonian Institution, Naţional Museum of Natural

History.80(bi): J.B. Caron; Wiwaxia ROM 56950–JBC08.80(bii): Naţional Geographic Image Collection/Alamy.80(ci): Smithsonian Institution, Naţional Museum of Natural History.80(cii): Nobu Tamura.80(di): J.B. Caron; ROM2010_117111_80.80(di):Catmando/Shutterstock.com)

81. Cele „cinci mari extincţii", conform unei baze de date a genurilor de animale marine (Universitatea din Wisconsin)

82. Tranziţia evolutivă de la peştii cu înotătoarele lobate la tetrapode (Desene adaptate cu permisiunea lui Jenny Clack)

83. Supercontinentul Pangeea (Keiff)

84. Evoluţia dinozaurilor de la începutul Triasicului până la sfârşitul Cretacicului

85. Locul de impact de la Chicxulub, aşa cum ar fi apărut la sfârşitul Cretacicului (Harta paleogeografică a limitei K–Pg de C.R. Scotese, PALEOMAP Project)

86. Intervalele timpului geologic din ultimii 540 milioane de ani

87. Fosila Ida *(Darwinius masillae)* (87(a): Martin Shields/Science Photo Library. 87(b): Bogdan Bocianowski)

88. Evoluţia primatelor de la începutul Paleocenului până în prezent

89. Urmele de picioare de la Lateoli (89(a): John Reader/Science Photo Library. 89(b): David A. Raichlen, Adam D. Gordon, William E.H. Harcourt–Smith, Adam D. Foster şi Wm. Randall Haas, Jr., *PLoS ONE,* 5 (2010) 69769)

90. Perioadele aproximative în care au trăit principalele specii implicate în povestea evoluţiei umane de-a lungul Pliocenului şi Pleistocenului

91. Comparaţie între craniile fosile de *Homo erectus* din Asia, *Homo heidelbergensis* din Africa, *Homo neanderthalensis* din Europa şi *Homo sapiens* din Asia (91(a): Muzeul de Istorie Naturală, Londra. 91(b): Волко В.П)

92. Cladograma istoriei recente a evoluţiei umane pe parcursul a 2 milioane de ani (Chris Stringer, Muzeul de Istorie Naturală)

93. Exemple de iluzii cognitive și „locul” conștiinței (93(a): Science Photo Library. 93(b): Ford Prime (Wikimedia Commons). 93(c): Corbis)

94. Zonele din creier implicate în percepția senzorială și procesarea de nivel înalt (94(b): Jacopin/BSIP/Alamy)

95. Simulări pe calculator prezentând vătămarea lobului frontal care i-a schimbat personalitatea lui Phineas Gage (95(a): Din colecția lui Jack și Beverly Wilgus. 95(b): Patrick Landmann/Science Photo Library)

96. Exemple de creștere a complexității în expresia abstractă și meșteșug odată cu Marele Salt înainte. (94(b): Jacopin/BSIP/Alamy) (96(a): Imagine obținută prin amabilitatea prof. Christopher Henshilwood, Universitatea din Bergen. 96(b): Fine Art Images/Heritage Images/Topfoto. 96(c): Dr. Maxime Aubert 96(d): RIA/Novosti/ Topfoto)

97. Sistemul taxonomiei biologice de la domeniu la specie

Prefață

Care este natura lumii materiale? Cum funcționează ea? Ce e universul și cum s-a format? Ce e viața? De unde venim și cum am evoluat? Cum și de ce gândim? Ce înseamnă să fii om? Cum ajungem să cunoaștem? Aceste întrebări și multe altele care decurg logic din ele sunt marile întrebări ale existenței umane. Ele sunt întrebările pe care ni le-am pus de când am început să gândim rațional.

Din răspunsurile pe care le descoperim sau le născocim țesem o poveste a creației, iar asemenea povești au stat la temelia tuturor culturilor de-a lungul istoriei. Avem pesemne o dorință înnăscută și irepresibilă de a înțelege cum am ajuns să fim ceea ce suntem și tot ce există în jurul nostru. Ea este declanșată în parte de simpla curiozitate, dar bănuiesc că și de o nevoie afectivă mai profundă de a stabili o legătură plină de semnificații cu lumea în care trăim.

Există numeroase versiuni ale poveștii creației. Cartea de față prezintă versiunea conformă cu știința modernă. Ea e rezultatul unui efort care a implicat (și continuă să implice) mii de oameni de știință, care pun laolaltă piesele unui imens puzzle, lansând mereu speculații și ipoteze, testând, dezbătând și revizuind. Acești oameni de știință se străduiesc

să se asigure că piesele puzzle-ului sunt fiecare în parte coerente și consistente. Dar pentru ca povestea să fie unitară și inteligibilă, piesele trebuie să se și potrivească între ele, de la scara mare a universului la *Homo sapiens*, la cele mai mici microorganisme și la particulele elementare din care e alcătuită întreaga substanță materială. E o constrângere puternică.

Acestea fiind spuse, nu există nicio versiune „autorizată" sau „oficială" a poveștii științifice a creației. Dacă ar exista, îmi permit totuși să sper că ar semăna *poate* cu cartea de față. Nu vreau să par melodramatic, însă cred că toate eforturile mele depuse vreme de peste douăzeci de ani în popularizarea științei s-au concentrat în ea. De fapt, e cartea pe care mi-am dorit dintotdeauna s–o scriu.

Toate bune și frumoase, dar e aceasta o carte pe care veți dori s–o citiți? Desigur, alegerea vă aparține, însă iată câteva lucruri la care veți vrea poate să reflectați. În primul rând, cred că e momentul potrivit pentru o carte precum *Origini.* În ultimii ani au apărut o sumedenie de cărți de știință popularizată care tratează noi teorii despre tot ce există sau susțin că trăim într-un univers care e doar unul dintr-o multitudine de universuri. De fapt însă, deși toate acestea ne sunt prezentate drept știință, nimic din ele nu e acceptat în afara unei comunități relativ restrânse de teoreticieni, și nu explică nimic relevant pentru povestea noastră. Am scris în altă parte despre aceste „basme" nefondate ale fizicii și cred (sau măcar sper) că cititorii le privesc cu tot mai multă prudență.[1]

Dar ce facem când suntem asaltați cu titluri de–o șchioapă care vestesc o descoperire spectaculoasă privind originile noastre, pentru ca peste câteva luni concluziile să fie retrase, când se dovedește că analiza a fost greșită, iar anunțul prematur? în aceste condiții, pierzi lesne din vedere ceea ce se consideră a fi rezultate, științifice sigure. Și ce facem când citim cărți în care oamenii de știință pledează în favoarea teoriilor preferate – teorii pe care foarte puțini colegi din comunitatea științifică le iau de bune? Să-i credem pe cuvânt?

În *Origini* am încercat să deosebesc rezultatele sigure de explicații larg acceptate, de interpretări discutabile și de pure speculații. Aceasta e o carte pentru cei care își doresc o perspectivă clară, echilibrată și (sper)

lipsită de prejudecăţi asupra a ceea ce credem că ştim şi că putem explica. Există, desigur, lacune şi lucruri pe care nu le înţelegem limpede, iar pe alocuri în povestire, oamenii de ştiinţă au fost siliţi să dea frâu liber metafizicianului din ei. Am avut grijă s–o subliniez de fiecare dată.

În al doilea rând, cine vrea să urmărească relatarea ştiinţifică a creaţiei de la big bang până la comportamentul oamenilor moderni va trebui să străbată multe hotare ştiinţifice. Între acestea se numără (trageţi aer în piept!) aspecte ale cosmologiei şi fizicii particulelor; sinteza primară a hidrogenului şi heliului; formarea stelelor şi galaxiilor; evoluţia stelelor şi nucleosinteza; formarea şi diferenţierea planetelor; chimia vieţii; evoluţia codului genetic, a organismelor unicelulare simple, a celulelor complexe şi a organismelor pluricelulare; succesiunea extincţiilor în masă şi a radiaţiilor care au modelat profund evoluţia animalelor marine şi terestre; apariţia (şi dispariţia) dinozaurilor; apariţia mamiferelor, a primatelor, a primilor hominizi, a genului *Homo*, a speciei *Homo sapiens* şi evoluţia conştiinţei umane.

Sunt tare multe, iar ziua e scurtă. Există destule cărţi accesibile şi pasionante despre fiecare dintre aceste subiecte, dar cred că *Origini* e unică prin faptul că încearcă să cuprindă povestea ştiinţifică actuală într-un singur volum. Această poveste ne va purta într-o călătorie de la „începuturile” universului până la originile şi evoluţia conştiinţei umane, 13,8 miliarde de ani mai târziu. Oricare ar fi motivul de a mă urma în călătorie, trebuie să vă previn asupra drumului pe care îl avem de străbătut. Voi încerca să explic ce face ca povestea ştiinţifică a creaţiei să fie atât de deosebită şi de ce cred că e mai convingătoare şi, în ultimă instanţă, mai satisfăcătoare decât alte versiuni de care aţi mai auzit.

Ţin să vă asigur că nu e o satisfacţie născută din certitudinea arogantă a triumfalismului sau autoritarismului ştiinţific. Departe de aşa ceva. Cu toate că răspunsurile sunt foarte interesante, adesea *întrebările* fără răspuns sunt cele fascinante. Satisfacţia e dată de recunoaşterea faptului că, deşi cunoaştem multe (sau aşa ne închipuim), nu ştim totul, iar răspunsurile noastre vor fi probabil modificate sau complet înlocuite pe măsură ce vom afla mai multe despre lume, despre noi înşine şi despre locul nostru în lume. Unii pot considera aceasta o

slăbiciune, dar viața m–a învățat să-i privesc cu suspiciune pe cei ce pretind că au ajuns la certitudini. Pesemne că peste zece ani povestea se va modifica în unele aspecte subtile sau mai puțin subtile, și vă garantez că noua versiune va fi mai *bună*.

Acest lucru numit știință

În octombrie 1956, cu doar câteva luni înainte să mă nasc, chimistul și romancierul C.P. Snow scria despre cele „două culturi" – științele exacte și științele umaniste – într-un articol din revista *New Statesman*. Sciziunea, din păcate, e astăzi mai mare decât oricând. Este adânc înrădăcinată ideea că știința nu se referă la „noi", că–i lipsește empatia umană. Se crede că știința presupune aplicarea unei metodologii care decurge dintr-o logică rece, inumană, că e obsedată de mecanisme materialiste care înjosesc spiritualitatea umană. Se mai crede că știința poate răspunde la întrebarea „cum?" legată de mecanica fizicii, chimiei și biologiei, dar nu și la mai profunda și la fel de fascinanta întrebare „de ce?".

Eu cred că în *Origini* e vorba cu adevărat despre „noi", că e povestea *noastră* care ne spune cum s-a născut lumea în care trăim, cum a început și a evoluat viața pentru ca noi să apărem: ființe conștiente, inteligente, capabile să–și investigheze științific propriile începuturi. Știința funcționează deoarece atunci când o aplicăm ne supunem unei discipline riguroase. Ceea ce facem este adesea contra–intuitiv și contra–cultural, și necesită un mare efort intelectual. Impunem standarde exigente în explicarea și raportarea datelor științifice. Cerem teoriilor științifice să se potrivească cu aceste date, să conducă la predicții accesibile observației și experimentului și să ofere o înțelegere veritabilă (însă există multe zone gri).

Dar știința ne mai cere și să adoptăm o atitudine sau o perspectivă numită de regulă „principiul copernican". Deși oamenii de știință sunt în chip fundamental preocupați de „noi", ei presupun că nu avem nimic *special* După cum vom vedea în *Origini*, când pășim în afara sferei umane de preferințe și prejudecăți, descoperim că nu suntem observatori privilegiați ai universului în care trăim. Știința ne spune că suntem doar o *parte* a acestei realități care a evoluat natural, iar nu *motivul* ei.

Cu alte cuvinte, universul nu are niciun *scop,* cel puțin dacă interpretăm scopul în context uman. Dacă teleologia se referă la căutarea unui scop sau a unui proiect în natură, atunci știința e prin definiție ferm antiteleologică. Nu cred că asta face știința inumană, ci înseamnă doar că oamenii nu pot aplica metoda științifică fără o anumită *modestie.*

Aici e punctul delicat. Multe dintre întrebările noastre „de ce?" sunt de regulă călăuzite de căutarea omenească a unui scop și a sensului vieții. N-ar trebui să ne surprindă că știința va încerca să răspundă la ele, admițând că există într-adevăr răspunsuri. Dar altul e rostul științei, iar dacă vrem răspunsuri la asemenea întrebări, ele trebuie căutate în alte sisteme de credințe. E astfel știrbit prestigiul științei? Nicidecum. Chiar dacă nu poate răspunde la multe dintre întrebările noastre „de ce?", adevărul este că nu–i cunoaștem limitele. Unul dintre cele mai remarcabile aspecte ale științei moderne este capacitatea ei de a oferi răspunsuri la întrebări care până nu demult țineau de domeniul marilor preoți, care obișnuiau să-l confunde pe „de ce?" cu „cum?". Avem încă multe de aflat.

Povestea pe scurt

Origini spune povestea științifică a creației în ordine cronologică, începând cu originea universului – a spațiului, timpului și energiei – într-un „big bang". Primele trei capitole prezintă originea și expansiunea universului până la ceea ce se numește recombinare, petrecută cu vreo 380.000 de ani mai târziu, când e eliberată radiația electromagnetică pe care azi o identificăm cu radiația cosmică de fond. În această etapă din istoria universului apar deja toate elementele sale constitutive – spațiu, timp, energie, materie (materia întunecată și atomii de hidrogen și heliu) și lumina.

Pentru a înțelege această primă etapă, combinăm modelele cosmologice numite inflaționare cu modelul standard din fizica particulelor. Pentru primele momente ale universului suntem obligați să apelăm la ipoteze și să extrapolăm teoriile la energii dincolo de domeniul lor de aplicare și de valabilitate. Rămân multe lucruri necunoscute despre aceste prime momente din evoluția universului. Totuși, descoperirea a ceea ce pare a fi bosonul Higgs al modelului standard, în iulie 2012 la CERN, ne sugerează că ignoranța noastră

privind istoria universului s-ar putea limita la prima bilionime de secundă, ceea ce cred că nu–i rău deloc.

Alegând să spun povestea cronologic, a trebuit să accept unele provocări. Primele capitole fac apel la o fizică dificilă, iar din moment ce multe dintre dovezile observaționale pe care se bazează înțelegerea universului timpuriu decurg din evenimente petrecute mai târziu, sunt locuri în poveste în care vă rog să suspendați temporar cererea de a vă prezenta dovezi.

Capitolul 4 continuă povestea cu formarea primelor stele și galaxii, cândva între 300 și 550 milioane de ani după big bang. Vorbesc acolo despre rolul fundamental jucat de minusculele neomogenități în distribuția materiei, care, prin inflație, își pun amprenta asupra structurii la scară mare a universului, precum și despre misterioasa materie întunecată care se crede că reprezintă aproape 27% din masa–energie a universului de azi. Capitolele 4 și 5 prezintă felul în care înțelegem evoluția stelelor și a nucleosintezei stelare, în care sunt produse elementele chimice de la hidrogen la fier. Teribilele explozii ale supernovelor explică existența elementelor mai grele decât fierul.

Marea varietate de elemente chimice din praful și gazul ejectate în exploziile stelelor conduce la producerea moleculelor interstelare, dintre care multe sunt esențiale chimiei vieții. Aceste molecule însămânțează norii interstelari care se adună treptat și în cele din urmă colapsează pentru a forma stele din generația a treia, cu sisteme planetare asociate. Capitolul 6 vorbește despre formarea sistemului solar, în urmă cu aproximativ 4,6 miliarde de ani, dintr-un gigantic nor molecular aflat în rotație, care se contractă. Praful de la marginile norului se condensează pentru a forma primele roci și metale. Acestea se adună, cresc, pentru a forma planetezimale, care se combină în cele din urmă pentru a forma planetele interioare.

În capitolul 7 atenția noastră se îndreaptă spre începuturile Pământului – diferențierea lui în nucleu, manta, scoarță, ocean și atmosferă, precum și factorii care influențează compoziția și temperatura suprafeței lui. În urma ciocnirii cu un alt corp de dimensiuni planetare numit Theia, Pământul dobândește un satelit natural. În mantaua lichidă a Pământului are loc convecția, iar continentele încep să se deplaseze.

Realinierea planetelor externe declanșează „Ultimul Mare Bombardament”: miliarde și miliarde de tone de rocă și gheață izbesc suprafața terestră. Urmărim evoluția Pământului până când condițiile devin propice apariției vieții.

Capitolul 8 ne prezintă un Pământ cald, umed, relativ stabil, pe care sunt împrăștiați diverși compuși organici esențiali vieții, și cu sisteme geologice de pe fundul oceanului jucând probabil un rol important în transformarea substanțelor anorganice simple în sisteme biochimice complexe. Arhiva fosilelor arată că organisme primitive unicelulare existau pe Pământ acum aproximativ 3,5 miliarde de ani, la doar un miliard de ani de la formarea acestuia. Abiogeneza – generarea spontană a materiei vii din materia nevie – rămâne în esență un mister. Avem unele teorii interesante, dar nu și un „model standard” pentru apariția vieții.

Indiferent de natura procesului, știm că structurile biologice elementare apărute în urmă cu vreo 3,5 miliarde de ani stabilesc un tipar care va fi reprodus în formele ulterioare de viață. Capitolul 9 arată felul în care organismele unicelulare folosesc fotosinteza pentru a transforma planeta, pompând o imensă cantitate de oxigen în atmosferă, iar oxigenul oferă noi posibilități pentru evoluție. Unele organisme unicelulare se contopesc pentru a forma celule complexe, care, la rândul lor, formează organisme pluricelulare tot mai mari. După 2,8 miliarde de ani de evoluție apar primele animale primitive.

Povestea ultimelor 540 de milioane de ani din istoria Pământului stă sub semnul gheții și al focului. După cum aflăm din capitolul 10, planeta oscilează violent între epoci glaciare și perioade de erupții vulcanice, apărând cel puțin o dată ciocnirea cu un asteroid. Viața rezistă cu greu deopotrivă în oceane și pe uscat. Evoluția cunoaște perioade frenetice de diversificare a speciilor de animale, pentru ca apoi acestea să fie nimicite într-o serie de extincții în masă la nivel planetar. În timpul extincției în masă de acum 252 de milioane de ani, numită „Marea Moarte”, au dispărut aproape 95% din animalele marine și o mare parte din cele de uscat. Fiecare extincție e însă urmată de o „radiație” evolutivă în ecologiile aproape pustii care rezultă. Din cenușa „Marii Morți” apare epoca dinozaurilor, care vor fi și ei distruși de un asteroid acum 66 milioane de ani.

Printre ființele care supraviețuiesc acestei ultime calamități sunt și mici mamifere. Capitolul 11 prezintă radiația lor evolutivă, acordând o atenție aparte primatelor. Pe măsură ce speciile de primate se diversifică, ele urmează linii evolutive diferite, cam la fel ca ramurile unui arbore. Primele care se desprind sunt maimuțele tarsiere, urmate de maimuțele din Lumea Nouă, maimuțele din Lumea Veche, gibonii, urangutanii și gorilele. În fine, acum vreo 5–7 milioane de ani apar cimpanzeii împreună cu linia hominidelor.

Urmărirea filiației oamenilor moderni din acest punct e dificilă și uneori contestată, dar arhiva fosilelor arată că primii hominizi au apărut acum 4–7 milioane de ani, speciile din genul *Australopithecus* acum 2–4 milioane de ani, iar primele specii *Homo* acum 2 milioane de ani. Dintre acestea, *Homo sapiens* apare în Africa doar cu 200.000 de ani în urmă.

Nu încape îndoială că trăsătura distinctivă a oamenilor e conștiința umană. Capacitatea de a gândi abstract, de a crea concepte și dezvoltarea inteligenței le-a permis oamenilor să se elibereze din închisoarea prezentului și explică proliferarea unei omeniri ajunse la 7,4 miliarde de indivizi. Capitolul 12 încearcă să prezinte originea și evoluția conștiinței, baza ei genetică și legăturile strânse cu dezvoltarea limbajului și a societății.

În Tabelul 1 am schițat o „cronologie a creației", în care sunt enumerate originile diverselor componente, de la spațiu, timp și energie până la conștiința umană, măsurate din prezent (2017) și de la „momentul zero" al big bang-ului. Pentru a da o imagine mai elocventă, am exprimat și timpul scurs de la big bang într-o ipotetică „zi a creației" de 24 de ore.

În această cronologie, universul „începe" la miezul nopții. Particulele cu masă apar cu o fracțiune de secundă mai târziu, iar universul e scăldat în lumină după două secunde, la momentul recombinării, când electronii primordiali se alipesc de nucleele primordiale de hidrogen și heliu. Stelele și galaxiile apar între 12:30 și 1 a.m., iar moleculele complexe între 3 și 6:30 p.m., la timp pentru micul dejun.

Stăm apoi cu mâinile încrucișate o mare parte din zi (9–10 ore), așteptând să apară Soarele și Pământul pe la 4 p.m. La un moment dat în timpul acestei așteptări, expansiunea universului își schimbă sensul. Materia din univers, care până atunci încetinise rata expansiunii, devine atât de diluată încât „energia întunecată” (energia spațiului „gol”) preia controlul și începe să accelereze din nou expansiunea.

Tabelul 1. Cronologia creației

Cap.	Originea...	Măsurat din prezent (2017)[2]	Măsurat de la big bang	Reprezentat într-o singură „zi a creației”
1	Spațiului, timpului și energiei	13,8 Ga	„0”	Miezul nopții
2	Masei	13,8 Ga	10^{-12} s	O fracțiune după miezul nopții
3	Luminii	13,8 Ga	380.000 ani	Două secunde după miezul nopții
4	Stelelor și galaxiilor	13,5–13,3 Ga	300–550 milioane de ani	Între 12:30 și 1:00 a.m.
5	Moleculelor	10–12 Ga	1,8–3,8 miliarde de ani	Între 3:00 și 6:30 a.m.
6	Sistemului solar	4,6 Ga	9,2 miliarde de ani	Pe la 4 p.m.
7	Pământului			
8	Vieții	3,5 Ga	10,4 miliarde de ani	Pe la 6 p.m.

9	Celulelor complexe și organismelor pluricelulare	~ 2 Ga	11,8 miliarde de ani	Pe la 8:30 p.m.
10	Speciilor (diversitatea speciilor animale)	540 Ma	13,4 miliarde de ani	Puțin după 11 p.m.
11	lui *Homo sapiens*	200 ka	13,8 miliarde de ani	Cu o secundă înainte de miezul nopții
12	Conștiinței umane	50 ka	13,8 miliarde de ani	Cu vreo 300 de milisecunde înainte de miezul nopții

Viața apare pe la 6 p.m., iar celulele complexe și organismele pluricelulare pe la 8 p.m. Câteva ore mai târziu asistăm la începutul diversificării speciilor de animale în „explozia cambriană". Oamenii moderni apar cam cu o secundă înainte de miezul nopții. Conștiința umană se dezvoltă în această secundă, dar își atinge potențialul deplin odată cu tranziția către modernitatea comportamentală în „Marele Salt înainte", care are loc în ultimele 300 de milisecunde (miimi de secundă).

După cum sper ca *Origini* s–o arate limpede, aceste câteva sute de milisecunde au fost extrem de active.

1. La „început"

Originea spațiului, timpului și energiei

Nu vă lăsați amăgiți. Indiferent ce veți fi citit în unele cărțile de popularizare sau articole recente și oricât de convingătoare vi se vor fi părut, vă asigur că *nimeni* nu știe cum a început universul. Și nici măcar dacă „început" e un cuvânt potrivit. Iar asta dintr-un motiv întemeiat După cum vom vedea în cele ce urmează, știm că universul se extinde. Extrapolând către trecut, știm deci că trebuie să fi existat un moment în

istorie când întreaga energie din univers era compactată într-un punct infinit de mic, din care a izbucnit în ceea ce numim „big bang”.

De unde știm? Capitolul de față va da unele răspunsuri la această întrebare, iar eu voi oferi dovezi în favoarea big bang-ului și a expansiunii universului în următoarele capitole, care tratează evoluţia universului în primii săi 380.000 de ani. E de-ajuns să spunem că ceva de genul big bang-ului *trebuie* să se fi petrecut, iar cea mai bună estimare este că a avut loc acum 13,8 miliarde de ani, cu o marjă de eroare de câteva sute de milioane de ani.

A prezenta însuși „începutul” universului e problematic pur și simplu fiindcă niciuna dintre teoriile noastre nu poate face față acestei sarcini. Noi încercăm să înţelegem evoluția spațiului, timpului, masei și energiei aplicând relativitatea generală a lui Albert Einstein. Această teorie funcţionează excelent, dar când avem de-a face cu obiecte foarte mici, trebuie să apelăm la o structură complet diferită, numită teoria cuantică. Relativitatea generală poate trata anumite lucruri așa cum teoria cuantică n–o poate face, și vice versa. Dar când încercăm să punem laolaltă aceste două teorii pentru a crea o teorie unificată, vedem că ele nu se potrivesc, iar întreaga structură se prăbușește. Deocamdată totul rămâne speculativ și nu există un consens privind felul în care trebuie să arate o teorie cuantică a gravitației.

Și mai e ceva. Extrapolările noastre pornind din prezent ne spun că energia unui big bang fierbinte trebuie să fi fost mult, mult mai mare decât orice energie pe care putem spera s–o recreăm pe Pământ într-un accelerator de particule. Așadar, chiar dacă într-o bună zi vom avea o teorie pe care s–o aplicăm cu oarece încredere, niciodată nu vom fi în stare să construim un dispozitiv pentru a efectua experimentele și observațiile prin care să testăm predicţiile unei asemenea teorii.[3] Nu ne rămâne decât să ne bazăm pe ce putem descoperi în universul observabil și să deducem din teoriile noastre ce s-ar fi *putut* întâmpla în trecutul îndepărtat.

Asta înseamnă că începutul propriu–zis al universului (dacă *început* e cuvântul potrivit) se află dincolo de domeniul științei în viitorul previzibil, dacă nu cumva pentru totdeauna. Ceea ce, desigur, nu ne împiedică să facem speculații, și există multe teorii care dau diverse

variante ale originii universului. În unele dintre ele, universul apare „din nimic" într-o fluctuație cuantică[4]. În altele, universul e doar unul dintr-un număr mare (poate infinit) de bule spațio–temporale expandate într-un „multivers" de posibilități. În altele, big bang-ul rezultă din colapsarea universului anterior, când butonul cosmic de „reset" e iarăși apăsat într-o succesiune ciclică eternă.

Nu există nicio dovadă empirică pentru vreuna dintre aceste idei. E posibil ca unele teorii să fie dezvoltate până în punctul în care să prezică fenomene fizice subtile, detectabile în universul nostru folosind instrumente de pe Pământ sau din sateliți (dar cred că e o posibilitate îndepărtată). Chiar și atunci însă, după cum am spus, predicția unor fenomene observabile azi ne permite doar să deducem ce s-ar fi putut petrece la momentul big bang-ului sau înaintea lui. Alegerea unui scenariu va rămâne o chestiune de credință.

„Despre ceea ce nu se poate vorbi trebuie să se tacă"[5], spunea Ludwig Wittgenstein. E un sfat bun, dar cum v–am promis o carte despre origini, în acest capitol mă voi afla la granița dintre știința acceptată (ceea ce știm și putem dovedi) și teoretizarea speculativă (ceea ce putem doar presupune pe baza unor principii științifice care au o oarecare valabilitate). La momentul potrivit voi trage semnale de alarmă pentru a nu cădea în capcane metafizice.

Povestea creației începe cu originea spațiului, timpului și energiei, iar aici ne întâlnim cu prima noastră provocare. Ce sunt spațiul, timpul și energia? Cum le putem concepe?

Natura spațiului și a timpului

Stau la birou și scriu aceste cuvinte la o tastatură conectată *wireless* la un laptop, privind cum frazele mele iau formă pe un ecran. Dacă–mi iau ochii de pe ecran și privesc în jurul meu văd o cameră obișnuită cu patru pereți. Doi dintre ei, în stânga și în spatele meu, sunt acoperiți cu rafturi în care se află modesta mea colecție de cărți, iar în dreapta e o canapea pentru oaspeții care rămân peste noapte la mine (și pe care azi, în mod excepțional, nu se află cărți). La fel ca voi, nu ezit să conchid că lucrurile din camera mea sunt obiecte în spațiu.

Dar ce anume e spațiul? Mă pot mișca prin el, însă nu-l pot vedea și nu-l pot atinge. Spațiul nu e ceva ce percepem direct. Percepem obiecte (ecrane, cărți, canapele), iar între aceste obiecte există anumite relații pe care le numim relații spațiale: aici în stânga, acolo în dreapta. Dar spațiul însuși nu face parte din conținutul experiențelor noastre nemijlocite. Interpretăm că obiectele există într-un spațiu tridimensional ca rezultat al sintezei semnalelor electrice din creier transformate în percepții vizuale de mintea noastră.

În mod asemănător, mă deplasez în timp (într-o direcție), dar nu-l pot vedea și nu-l pot atinge. Timpul nu este un obiect palpabil Percepția timpului pare să rezulte din percepția sinelui și a obiectelor din jur care își schimbă pozițiile relative (asta *era* în stânga, acum *e* în dreapta) sau își schimbă natura de la un tip de lucruri la altul.

Există în această cameră spațiul independent de obiectele din ea? Există timpul independent de lucrurile care se petrec? Cu alte cuvinte, sunt spațiul și timpul lucruri–în–sine „absolute”? în dezvoltarea teoriei mecanicii, pe care o prezintă în capodopera sa *Principiile matematice ale filosofiei naturale* (1687), Isaac Newton era dispus să recunoască relativitatea esențială a spațiului și timpului în ceea ce el numea „experiența comună”. Era dispus să accepte că obiectele se mișcă apropiindu-se sau îndepărtându-se unele de altele, schimbându–și poziția relativă în spațiu și timp. Aceasta e mișcarea relativă, care poate fi definită simplu prin relațiile dintre obiecte. Dar teoria lui Newton impunea existența unei mișcări absolute care, susținea el, trebuie să implice un spațiu și un timp absolute alcătuind un fel de recipient în care obiectele există și lucrurile se întâmplă. Chiar dacă scoatem toate obiectele din univers, recipientul gol rămâne: tot va mai exista „ceva”.

Einstein era de altă părere. Și-a pus problema asta pe când lucra ca „expert tehnic de gradul trei” la Biroul Elvețian de Brevete din Berna, cu peste două secole mai târziu, în 1905. El a conchis că spațiul și timpul absolute nu pot exista, concluzie ce decurge din teoria relativității speciale. Această teorie se bazează pe două principii fundamentale. Primul, numit *principiul relativității*, afirmă că observatorii care se găsesc în stări de mișcare relativă cu viteze diferite (dar constante) *trebuie* să observe exact aceleași legi fundamentale ale fizicii.

Pare perfect rezonabil. Să presupunem că eu fac un set de măsurători aici, pe Pământ, din care deduc unele legi ale fizicii. Tu faci aceleaşi măsurători la bordul unei nave spaţiale care se îndepărtează cu mare viteză de Pământ. Concluziile pe care le tragem din cele două seturi de măsurători trebuie să fie identice. Nu pot exista un set de legi ale fizicii pentru mine şi altul pentru observatorul din spaţiu, fiindcă altminteri n-ar mai fi legi. Putem pune problema invers. Dacă legile fizicii simt aceleaşi pentru toţi observatorii, atunci nu există nicio măsurătoare care să ne spună care observator se mişcă în raport cu celălalt. Se poate la fel de bine ca tu să fii în repaus, iar eu să mă îndepărtez cu mare viteză. Nu putem face diferenţa folosind măsurători fizice.

Al doilea principiu al lui Einstein se leagă de viteza luminii. Pe când Einstein lucra la relativitatea specială, fizicienii fuseseră obligaţi să conchidă că viteza luminii e constantă, independent de viteza sursei de lumină. Dacă eu măsor viteza luminii emise de o sursă staţionară de pe Pământ, iar tu măsori viteza luminii emise de aceeaşi sursă de la bordul unei nave spaţiale deplasându-se cu mare viteză, ne aşteptăm să obţinem exact acelaşi rezultat. În loc să încerce să–şi explice *de ce* viteza luminii e independentă de viteza sursei, Einstein a acceptat acest lucru ca pe un fapt. El a presupus că viteza luminii e o constantă universală, şi s-a apucat să deducă ce decurge de aici.

O consecinţă imediată este că nu există timp absolut. Iată de ce. Să presupunem că observi un eveniment ieşit din comun. În timpul unei furtuni vezi două trăsnete care lovesc pământul simultan, unul în stânga ta, celălalt în dreapta. Te afli în repaus, aşa încât faptul că îi ia un timp luminii celor două trăsnete pentru a ajunge la tine nu are consecinţe reale. Lumina călătoreşte foarte repede, iar tu vezi ambele trăsnete în momentul în care cad. Eu însă văd altceva. Mă deplasez cu mare viteză – jumătate din viteza luminii – de la stânga la dreapta. Trec prin dreptul tău chiar în momentul în care faci observaţiile. Deoarece mă mişc atât de repede, timpul în care lumina trăsnetelor ajunge la mine are consecinţe măsurabile. Când ajunge la mine lumina de la fulgerul din stânga, eu m–am mişcat mult spre dreapta, aşa încât lumina are de străbătut o distanţă mai mare. Dar lumina de la fulgerul din dreapta are o distanţă mai mică de parcurs, fiindcă m–am apropiat de

ea. Rezultatul e că văd trăsnetul din dreapta lovind primul (figura 1). Tu vezi trăsnetele lovind simultan, eu nu. Cine are dreptate?

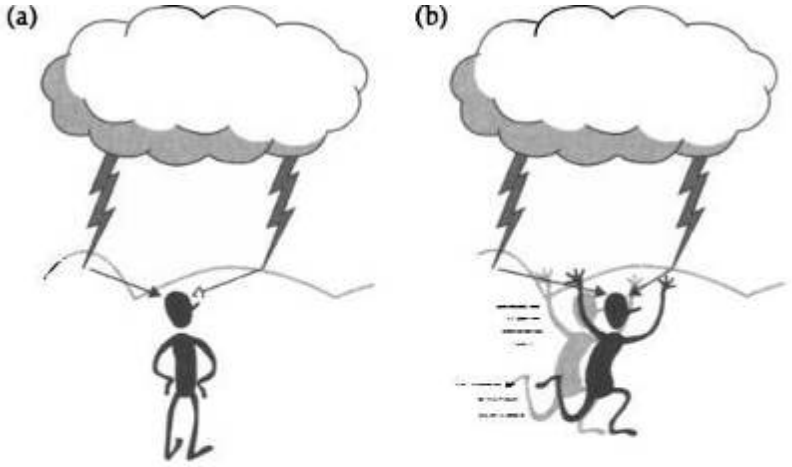


Figura 1. *Observatorul staționar din (a) vede trăsnetele lovind simultan, fiindcă lumina ambelor trăsnete călătorește atât de repede, încât ele par instantanee. Însă observatorul din (b), deplasându-se cu o fracțiune importantă din viteza luminii, vede altceva. El se deplasează cu jumătate din viteza luminii de la stânga la dreapta, așa încât atunci când lumina de la trăsnetul din stânga ajunge la el, el s-a deplasat spre dreapta. Lumina de la trăsnetul din dreapta are de parcurs o distanță mai mică. Observatorul din (b) vede deci că trăsnetul din dreapta lovește primul.*

Amândoi avem dreptate. Principiul relativității cere ca legile fizicii să fie aceleași, indiferent de mișcarea relativă a observatorului, și nu putem folosi măsurători fizice pentru a spune care din noi doi se mișcă. Trebuie deci să conchidem că nu există simultaneitate absolută. Nu există niciun sistem de referință hotărâtor sau privilegiat în care să putem spune că aceste lucruri au loc exact în același timp. Ele se pot petrece simultan în acest sistem de referință, după cum se pot petrece la momente diferite în alt sistem, iar toate sistemele sunt la fel de valabile. Prin urmare, nu poate exista un timp „real” sau absolut. Percepem evenimentele diferit, pentru că timpul e relativ.

Einstein a elaborat un set asemănător de argumente pentru a demonstra că și spațiul e relativ. Consecințele stranii ale relativității speciale sunt bine cunoscute. Condiția ca legile fizicii să apară la fel tuturor observatorilor dintr-un univers în care viteza luminii e fixă face ca intervalele de timp (duratele) să se poată dilata, iar intervalele spațiale (distanțele) să se poată contracta. Asta înseamnă că observatori diferiți călătorind cu viteze diferite vor măsura durate și distanțe diferite.

Dar nu e totul pierdut. Dilatarea timpului şi contracţia distanţei sunt ca două feţe ale aceleiaşi monede. Ele sunt legate prin raportul dintre viteza observatorului care face măsurătorile şi viteza luminii. Combinând spaţiul şi timpul într-un *spaţiu–timp* cvadridimensional, intervalele măsurate în acest spaţiu–timp nu sunt afectate de relativitate. În intervalele spaţio–temporale, dilatările tipului sunt compensate de contracţiile distanţelor, şi vice versa.

Rezultă oare de aici că, deşi spaţiul şi timpul sunt relative, spaţiul–timp e absolut? Unii fizicieni contemporani cred că da, alţii cred că nu. Important pentru noi e să înţelegem că trebuie să abandonăm ideea noastră simplistă, de bun–simţ, că spaţiul şi timpul sunt independente, şi să acceptăm că în universul nostru ele sunt inextricabil legate.

Masa și energia

Articolul lui Einstein din 1905 despre relativitatea specială era extrem de simplu, dar avea implicaţii profunde. El a continuat să se gândească la consecinţele teoriei, iar la câteva luni a publicat o scurtă completare în aceeaşi revistă. În al doilea articol considera cazul în care un obiect în mişcare emite două fascicule de lumină în direcţii opuse. Întreaga energie iniţială a obiectului e sub forma energiei de mişcare (energie cinetică). Fiecare fascicul luminos preia aceeaşi cantitate de energie de la obiect, 1/2 *E.* Cum energia totală trebuie să se conserve, energia cinetică a obiectului trebuie să scadă cu *E,* ceea ce e perfect logic, odată ce lumina transportă energie, iar energia trebuie să vină de undeva.

Şi-a imaginat apoi ce ar măsura doi observatori, unul deplasându-se împreună cu „sistemul de referinţă de repaus" al obiectului (faţă de care obiectul se află în repaus), iar celălalt deplasându-se cu viteză constantă în raport cu acest sistem de referinţă. Observatorii măsoară diferenţa de energie a obiectului înainte şi după emisia luminii. Einstein a găsit, deloc surprinzător, că observatorii obţin rezultate diferite. După câteva calcule, a ajuns la o expresie matematică din care decurgea o concluzie remarcabilă. Energia fasciculelor de lumină provine din energia cinetică a obiectului, care poate fi calculată din masa şi viteza sa.[6] Din diferenţa dintre cele două seturi de rezultate, Einstein a dedus că energia emisă nu provine de la viteza obiectului (cum era de aşteptat), ci de la *masa* lui.

Dacă energia totală transportată de lumină este *E,* Einstein a conchis că masa *m* a obiectului trebuie să scadă cu E/c^2, unde *c* este viteza luminii. Nu contează cu ce fel de obiect avem de-a face, e un rezultat general, universal aplicabil. Masa inerţială a unui obiect (o măsură a rezistenţei sale la accelerare) e în acelaşi timp o măsură a cantităţii de energie pe care o conţine. Astăzi ne-am grăbi pesemne să rearanjăm ecuaţia din articolul lui Einstein pentru a obţine celebra formulă $E = mc^2$. Dar Einstein n-a făcut-o. Deşi nu era sigur că acest lucru va putea fi vreodată testat experimental, era pregătit să accepte ipoteza că într-o bună zi transformarea masei în energie va fi observată la substanţele radioactive cum e radiul.

Teoria specială a relativităţii pune în dificultate ideile noastre de bun–simţ privind realitatea fizică a spațiului și timpului, a materiei și energiei. Spațiul și timpul sunt relative, ele sunt definite de lucrurile pe care le conţin și de evenimentele care au loc, dar spațiul–timp *ar putea* fi absolut. Masa e energie, iar din energie poate izvorî masă. Aceste modificări ale ideilor noastre comune sunt importante dacă vrem să înțelegem ce anume a apărut la big bang. Mai e însă și o altă modificare de care trebuie să ținem cont. Spațiul–timp și masa–energie nu sunt complet independente una de alta. Ele sunt prinse într-un dans elegant descris de teoria generală a relativităţii a lui Einstein.

Gravitația și geometria

Gravitaţia e o forţă pe care o cunoaștem bine. Când dau drumul unui obiect, el cade pentru că e supus forţei gravitaţionale. Ne luptăm cu această forţă în fiecare dimineaţă când ne sculăm din pat sau când ridicăm ceva greu. Gravitaţia e de vină când ne împiedicăm și ne lovim la genunchi. Ne e atât de familiară, încât suntem tentaţi să presupunem că știința trebuie să fi răspuns de mult la toate întrebările legate de ea.

Și într-adevăr, învăţăm la școală legea atracţiei universale a lui Newton. Obiectele materiale se atrag reciproc cu o forţă proporţională cu produsul maselor și invers proporţională cu pătratul distanţei dintre ele.[7] Deşi legea lui Newton a fost o mare realizare, în interpretarea ei apar unele dificultăţi cunoscute din vremea lui Newton, dar pe care el n-a reuşit să le rezolve. În universul mecanic descris de legile newtoniene ale mișcării, interpretăm forţa ca pe ceva care e exercitat

sau imprimat de obiecte care se lovesc unele de altele. O piatră nu se mișcă dacă nu–i tragem un șut sau n–o aruncăm, accelerând–o până la o viteză finală cu care pornește prin aer. Dar ce anume menține Luna în îmbrățișarea gravitațională a Pământului? Cum produce Luna mareele? Când un pahar cu cocktail alunecă printre degetele unui invitat, ce îl apucă și îl izbește de podea? Newton era nedumerit. Forța gravitației părea să implice o stranie „acțiune la distanță". Obiectele se influențează reciproc la mari distanțe prin spațiu gol, fără să pară că se transmite ceva între ele. Criticii l-au acuzat că introduce „elemente oculte" în mecanica sa.

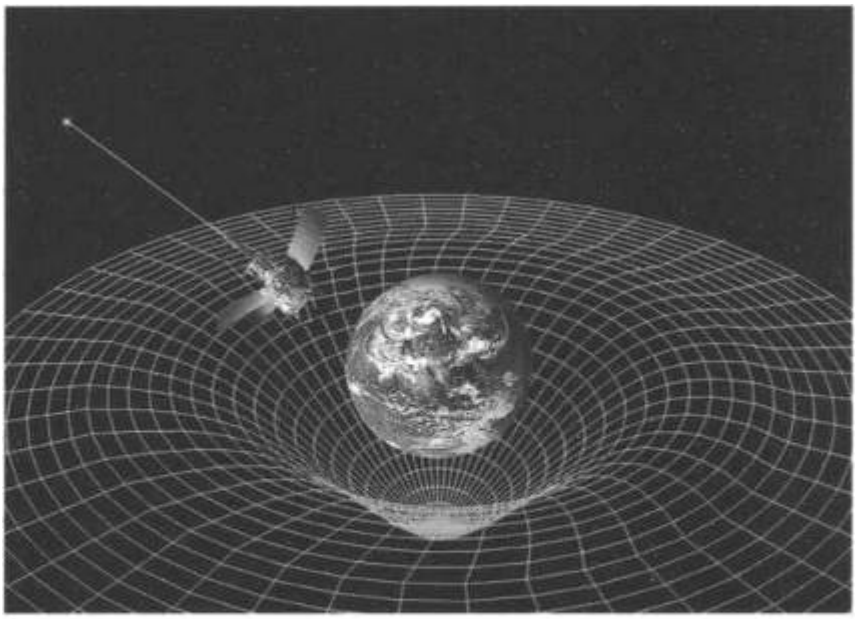
O parte din soluția acestei probleme a găsit–o Einstein în noiembrie 1907, pe când se afla la Biroul de Brevete, unde fusese promovat în funcția de „expert tehnic de gradul doi". „Stăteam pe scaun în biroul meu de la Berna. Brusc, am fost fulgerat de un gând: «Dacă un om e în cădere liberă, nu–și simte greutatea»", avea să–și amintească el mai târziu.[8] Cu această observație uimitor de simplă, Einstein a înțeles că, local, resimțim gravitația la fel ca accelerația – idee pe care a numit–o principiul echivalenței. Pentru a calcula consecințele ei a muncit încă opt ani și a trebuit să facă o legătură spectaculoasă între gravitație și geometrie.

Geometria pe care o învățăm la școală se numește geometrie euclidiană, după matematicianul grec Euclid din Alexandria. În această geometrie, dreptele paralele nu se intersectează niciodată, suma unghiurilor unui triunghi este de 180 de grade, iar circumferința unui cerc e dublul razei înmulțit cu π. Este o geometrie asociată cu un tip de spațiu tridimensional pe care matematicienii îl numesc „plat". Noi învățăm geometria euclidiană fiindcă spațiul–timp din universul nostru se întâmplă să fie plat.

Într-un spațiu plat, distanța cea mai mică între două puncte e linia dreaptă pe care o trasăm între ele. Care e însă cea mai mică distanță dintre Londra și Sydney? Răspunsul pe care îl găsim este 10.553 de mile, numai că această distanță nu e o linie dreaptă. Suprafața Pământului e curbă, iar distanța cea mai mică dintre două puncte de pe ea este de fapt o linie curbă numită *geodezică*.

Urmează un salt uimitor în imaginație: și dacă spațiul–timp din apropierea unui obiect masiv nu e „plat”? Ce s-ar întâmpla dacă ar fi curb? Einstein și-a dat seama că putea scăpa de acțiunea la distanță implicată de gravitația newtoniană înlocuind–o cu un spațiu–timp curb. Un obiect cu o masă–energie mare deformează spațiul–timp din jurul lui, iar obiectele din apropiere urmează drumul cel mai scurt determinat de acest spațiu–timp curb.

Mai târziu, fizicianul american John Wheeler avea să rezume astfel situația: „Spațiul–timp îi spune materiei cum să se miște; materia îi spune spațiului–timp cum să se curbeze.”[9] În relativitatea generală, gravitația nu e o forță pe care materia o exercită asupra materiei, ci e o forță pe care materia (sau, riguros vorbind, masa–energie) o exercită asupra spațiului–timp însuși. Obiectele resimt o atracție gravitațională reciprocă, dar atracția e *indirectă*, e mijlocită de curbura spațiului–timp dintre ele.



Sonda Gravity B a fost lansată în aprilie 2004 și a măsurat două fenomene asociate curburii spațiului-timp din apropierea Pământului. Rezultatele au fost anunțate în mai 2011, confirmând în detaliu relativitatea generală. Imaginea reprezintă satelitul mișcându-se în spațiul-timp curb din jurul Pământului, orientat spre steaua IM Pegasi din constelația Pegas.

Acestea sunt efecte subtile, dar reale. Teoria relativității generale prezice corect unele particularități ale orbite planetei Mercur care se datorează curburii spațiului–timp din apropierea Soarelui,

particularităţi pe care teoria newtoniană a gravitaţiei nu le poate prezice corect. Şi cu toate că lumina de la o stea îndepărtată care, în drumul ei spre Pământ, trece pe lângă Soare urmează o traiectorie dreaptă, curbura spaţiului–timp din apropierea Soarelui face ca traiectoria să apară curbată. Când acest fenomen a fost pus în evidenţă în timpul unei eclipse totale de Soare din 1919, Einstein a devenit celebru.[10]

La 24 aprilie 2004 a fost lansată sonda Gravity B pe o orbită polară, la 642 km deasupra Pământului. La bordul său se aflau patru giroscoape destinate să măsoare efectele curbării spaţiului–timp din apropierea Pământului. Pentru a elimina torsiunile nedorite, satelitul se rotea o dată la fiecare 78 de secunde, iar propulsoarele îl îndreptau constant spre steaua IM Pegasi din constelaţia Pegas (figura 2). Două efecte au fost măsurate. Curbura spaţiului–timp provoacă precesia[11] giroscoapelor în planul orbitei satelitului (pe direcţia nord–sud), efect numit *derivă geodezică.* Al doilea efect este *antrenarea sistemului de referinţă.* Când Pământul se învârte în jurul axei sale, el trage după sine spaţiul–timp din apropiere în planul perpendicular pe planul orbitei satelitului (pe direcţia est–vest). Aceasta generează o a doua precesie a giroscoapelor. Rezultatele au fost anunţate într-o conferinţă de presă pe 4 mai 2011. Deşi o oscilaţie neaşteptată a giroscoapelor provocase anumite dificultăţi, rezultatele au confirmat strălucit relativitatea generală. Şi o ultimă dovadă. În iunie 1916 Einstein a emis ipoteza că mici fluctuaţii ale câmpului gravitaţional ar apărea ca unde, la fel ca valurile pe suprafaţa unui lac. Asemenea *unde gravitaţionale* ar fi produse de două corpuri masive rotindu-se unul în jurul altuia în ceea ce astronomii numesc sistem binar, întinzând şi comprimând spaţiul–timp dintre ele. Abia în anii 1950 şi 1960 fizicienii s-au gândit că ar putea detecta undele gravitaţionale, iar pe 15 septembrie 2015 au fost într-adevăr detectate unde gravitaţionale generate de fuzionarea a două găuri negre, într-un experiment numit LIGO (Laser Interferometry Gravitational–wave Observatory – Observatorul de unde gravitaţionale prin interferometrie laser). Rezultatul a fost anunţat într-o conferinţă de presă pe 11 februarie 2016. De atunci au mai fost raportate câteva fuzionări de găuri negre, iar în 2017 undele gravitaţionale produse de ciocnirea a două stele neutronice au fost observate de LIGO şi în

experimentul Virgo din Italia. Detectarea undelor gravitaţionale este o excepţională confirmare a relativităţii generale şi deschide o nouă fereastră către evenimente din zone îndepărtate ale universului, fără a face apel la lumină sau alte forme de radiaţie electromagnetică pentru a ne spune ce se întâmplă.

Universul în expansiune

În 1915 Einstein şi-a prezentat relativitatea generală la Academia Prusacă de Ştiinţe din Berlin. Doi ani mai târziu a aplicat teoria întregului univers. La prima vedere, pare teribil de greu. Cum poate un singur set de ecuaţii să descrie întregul univers? Răspunsul este: făcând câteva presupuneri simplificatoare. Einstein a trebuit să presupună că universul e uniform în toate direcţiile, conţinând obiecte care au acelaşi tip de compoziţie. El a trebuit de asemenea să presupună că universul observat de pe Pământ nu diferă de universul observat din oricare alt punct. Cu alte cuvinte, observatorii de pe Pământ nu ocupă o poziţie specială sau privilegiată. Ceea ce observăm este un „eşantion reprezentativ" pentru ansamblul universului.

Einstein a obţinut ceva foarte interesant: un univers finit, şi totuşi „nelimitat", fără margini. Noi ştim că solul pe care mergem pare plat, dar dacă mergem suficient de departe într-o direcţie, mai ştim şi că în cele din urmă vom face ocolul Pământului, fără să cădem de pe marginea lui. În universul lui Einstein spaţiul–timp se curbează închizându-se în sine, la fel ca suprafaţa unei sfere. În orice punct din univers spaţiul–timp pare plat, dar de fapt e uşor curbat. Einstein a dat însă curând peste o mare dificultate. El anticipase că universul care rezulta din ecuaţiile lui trebuia să fie în acord cu prejudecăţile ştiinţifice predominante – un univers stabil, static şi etern. Ceea ce a obţinut era un univers dinamic – în expansiune sau în contractare, în funcţie de presupunerile iniţiale. Ecuaţiile de câmp sugerau că un univers static e imposibil.

Gravitaţia e cea mai slabă dintre forţele naturii (ne vom întâlni cu celelalte forţe în acest capitol), dar e cumulativă, inexorabilă şi acţionează într-o singură „direcţie" – face să se atragă obiectele între ele, nu şi să se respingă. Einstein a înţeles că atracţia gravitaţională reciprocă dintre toate obiectele materiale din univers l-ar face să

colapseze. Era un rezultat îngrijorător, care contrazicea nu numai opinia general acceptată, dar și observațiile. După secole de astronomie, nu există nicio dovadă că stelele din univers ar goni unele spre altele într-o prăbușire catastrofală. Lucrurile stau mai curând invers, după cum vom vedea.

Dar nu exista nimic în ecuațiile câmpului gravitațional care să împiedice acest lucru. „A trebuit să introducem o extindere a ecuațiilor de câmp, care nu e justificată de cunoașterea actuală a gravitației", avea să explice Einstein mai târziu.[12] Membrul stâng al celei mai generale forme a acestei ecuații descrie curbura spațiului–timp, deci tăria forței gravitaționale ce va acționa asupra întregii mase–energie, care e rezumată în membrul drept al ecuației. Einstein a ales să modifice ecuația scăzând din membrul stâng un termen conținând o „constantă cosmologică", notată cu litera grecească A (lambda).

În esență, acest termen suplimentar impregnează spațiul–timp cu un fel de bizară forță antigravitațională, un fel de presiune negativă care se face simțită pe distanțe mari și contracarează efectul curbării provocate de întreaga masă–energie din univers. Prin alegerea atentă a valorii constantei cosmologice, Einstein a găsit că putea echilibra atracția gravitațională care tindea să adune totul laolaltă, produsă de întreaga masă–energie din membrul drept, cu un spațiu–timp din membrul stâng care are tendința de a îndepărta obiectele unele de altele. Rezultatul era echilibrul perfect, un univers static.

Era o soluție elegantă. Introducerea constantei cosmologice nu altera felul în care acționa relativitatea generală pe distanțe scurte, așa încât predicțiile legate de orbita lui Mercur și de curbarea luminii provenind de la stele rămâneau valabile. Era totuși o „născocire" nesatisfăcătoare – nu exista nicio dovadă în favoarea constantei cosmologice, cu excepția observației generale că universul *pare* să fie stabil și static.

Eliberate de prejudecățile privind tipul de univers care ar trebui să rezulte, ecuațiile de câmp ale lui Einstein produceau mai multe tipuri de soluții posibile. În 1922, fizicianul și matematicianul rus Aleksandr Friedmann a dat mai multe soluții ale ecuațiilor inițiale ale lui Einstein. Nu-l interesa neapărat să reprezinte universul nostru, preferând să exploreze diferitele posibilități matematice. Prin urmare, deși a păstrat

termenul cosmologic introdus de Einstein, el a presupus că aceasta poate lua orice valoare, inclusiv zero.

Friedmann a găsit diferite modele de univers posibile, cu proprietăţi şi comportament care depind de relaţiile dintre cantitatea de masă şi valoarea constantei cosmologice. El s-a concentrat asupra soluţiilor cu o curbură pozitivă a spaţiului–timp, arătând că acestea pot reprezenta un univers care se extinde sau se contractă. S-a ocupat mai ales de soluţii corespunzând unei constante cosmologice nule, care oscilează înainte şi înapoi, expansiunea alternând cu contracţia, perioada de oscilaţie depinzând de cantitatea de masă.

Despre un univers în care densitatea de masă–energie e mare (multe obiecte într-un volum de spaţiu dat) şi rata de expansiune e mică, spunem că e „închis". El se va extinde încetinit până se opreşte, pentru ca apoi să colapseze. Spaţiul–timp într-un asemenea univers are o curbură pozitivă. Câţiva ani mai târziu Friedmann a examinat universuri în care curbura spaţiului–timp e negativă. Asemenea universuri sunt infinite, spunem despre ele că sunt „deschise" şi se vor extinde pentru totdeauna.

Din păcate, Friedmann a murit de febră tifoidă în 1925. Soluţiile sale pentru un univers în expansiune au fost însă redescoperite în mod independent în 1927 de teoreticianul (şi preotul) belgian Georges Lemaître. La început Einstein a respins ideea unui univers în expansiune, dar la începutul anilor 1930, când dovezile astronomiei observaţionale[13] indicau că universul într-adevăr se extinde, a recunoscut că greşise şi a regretat că şi-a denaturat ecuaţiile.[14] Dovezile în favoarea unui univers în expansiune au devenit copleşitoare în 1965, odată cu descoperirea radiaţiei cosmice de fond. Aceasta e rămăşiţa rece a radiaţiei fierbinte care a umplut universul la scurt timp după naşterea lui. Ne vom întâlni cu ea în capitolul 3.

Dar ce anume *provoacă* extinderea universului? într-un articol publicat în 1933, Lemaître sugera că expansiunea e declanşată pentru că spaţiul–timp gol de fapt nu e gol. Einstein introdusese termenul cosmologic în membrul stâng al ecuaţiei sale de câmp ca o modificare a spaţiului–timp menită să compenseze efectele curburii produse de întreaga masă–energie din univers. Poţi însă foarte bine să muţi

termenul cosmologic din membrul stâng (spațiu–timp) al ecuației în membrul drept (masă–energie). Acum el reprezintă o contribuție *pozitivă* la întreaga masă–energie a universului. Nu e masa–energie cunoscută, pe care o asociem cu stelele, planetele și oamenii, ci ia forma unei energii a spațiului–timp gol numită *energia vidului*.[15] La acea vreme, articolul lui Lemaître n-a avut mari ecouri, dar trebuie să reținem legătura dintre rata de expansiune a spațiului–timp și energia vidului, fiindcă vom avea nevoie de ea în curând.

Timpul, dimensiunea și temperatura

Am ajuns în fine în punctul de unde ne putem începe povestea. Dacă universul se extinde, atunci logica elementară ne sugerează că putem „da ceasul înapoi" și conchide că trebuie să fi avut o origine la un moment dat. Din motive care se vor lămuri în capitolele următoare, credem că originea datează din urmă cu 13,8 miliarde de ani. Studiul evoluției universului din acel moment seamănă cu studiul evoluției unei bile omogene de materie fierbinte și densă care tocmai a explodat. Variabilele cărora trebuie să le acordăm mare atenție sunt timpul, dimensiunea și temperatura. Pe măsură ce trece timpul, universul se extinde, dimensiunea lui crește. Pe măsură ce se extinde, se răcește. Iar pe măsură ce se răcește, forma materiei din interiorul lui se schimbă.

Figura 3 (a) este o ilustrare tipică a expansiunii universului de la big bang până în prezent. Universul tridimensional e reprezentat printr-o secțiune bidimensională, iar expansiunea e reflectată de aria secțiunii pe măsura trecerii timpului. Materia din univers (planete, stele, galaxii) e ilustrată în interiorul secțiunii.

Observați că există unele subtilități – nu e o expansiune liniară pornind de la un „timp zero". Universul începe prin a fi infinit mic, apoi, brusc, suferă o scurtă explozie de dilatare exponențială ca rezultat al inflației cosmice (la care voi reveni). Pe urmă, universul se liniștește, rata de expansiune scăzând sub acțiunea de frânare a întregii mase–energii din univers. Ce nu ne arată figura 3(a) este că, la vreo 9 miliarde de ani după big bang, rata de expansiune începe din nou să fie accelerată.

Pe măsură ce universul se extinde, temperatura medie scade. Figura 3(b) prezintă această scădere a temperaturii din momentul în care are

sens să vorbim despre „temperatură”, la scurt timp după big bang, până în prezent.[16] Dreapta din grafic pare absurd de simplă, dar observați că și scara timpului, și cea a temperaturii sunt logaritmice – cresc ca puterile lui zece. Azi ne aflăm la 13,8 miliarde de ani după big bang, sau ceva mai mult de 400.000 de bilioane (4×1017) de secunde.[17]

Temperatura medie a universului e extern de importantă, fiindcă determină ce tipuri de lucruri și ce tipuri de forțe pot exista în el. Temperatura medie este deci folosită pentru a defini și a delimita o serie de „epoci” începând de la big bang, prin evoluția forțelor și a particulelor elementare, a nucleelor atomice, atomilor, stelelor și galaxiilor. Aceste epoci simt clasificate după temele predominante care modelează fizica universului. Primele epoci sunt dominate de forțele fizice. Următoarele epoci sunt dominate de particulele de materie, începând cu cuarcii și sfârșind cu fotonii. În primele trei capitole voi încerca să spun povestea evoluției de la big bang până la sfârșitul Epocii Fotonilor.

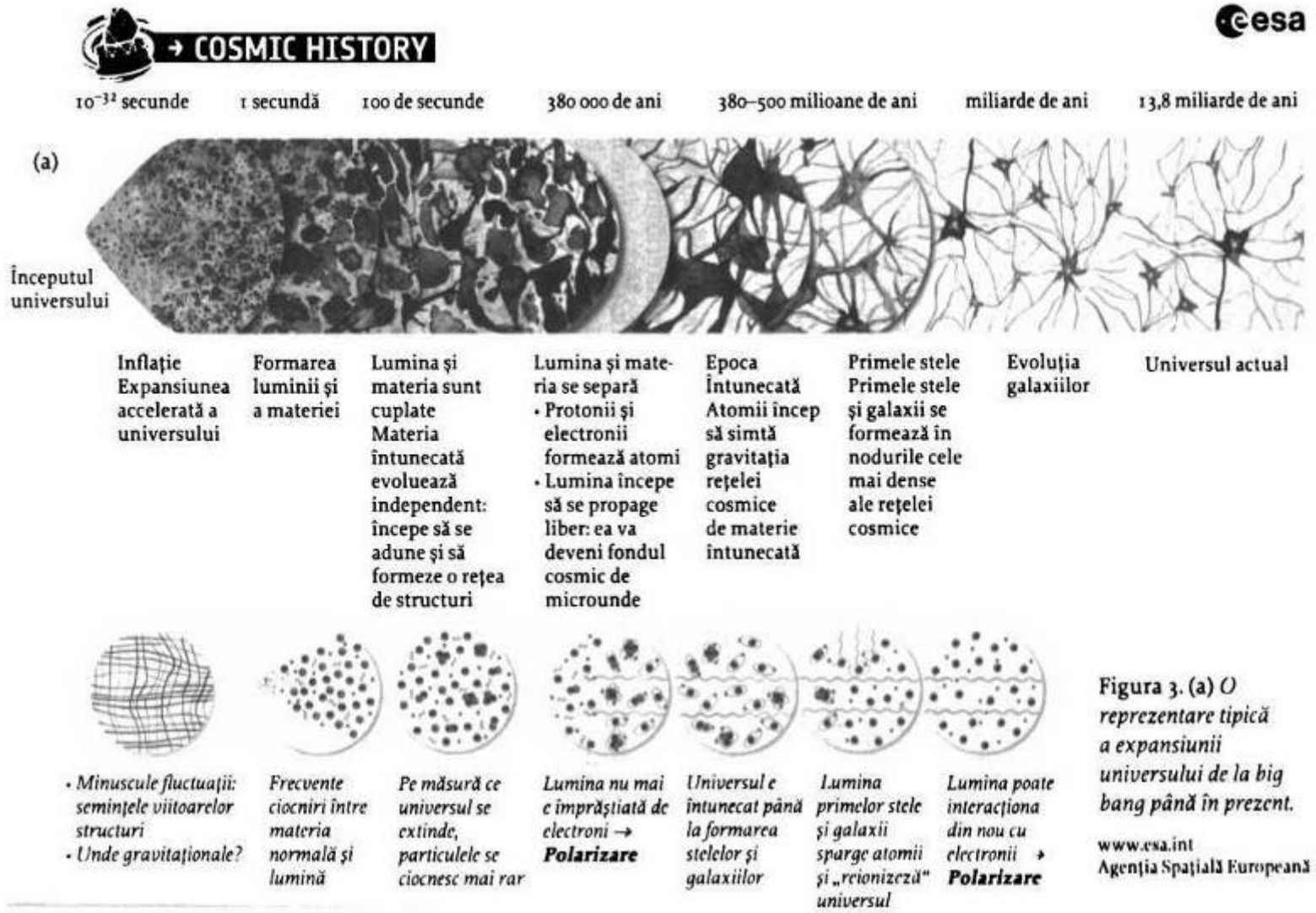

COSMIC HISTORY
esa
10⁻³² secunde
1 secundă
100 de secunde
380 000 de ani
380–500 milioane de ani
miliarde de ani
13,8 miliarde de ani
(a)
Începutul universului
Inflație Expansiunea accelerată a universului
Formarea luminii și a materiei
Lumina și materia sunt cuplate Materia întunecată evoluează independent: începe să se adune și să formeze o rețea de structuri
Lumina și materia se separă
• Protonii și electronii formează atomi
• Lumina începe să se propage liber: ea va deveni fondul cosmic de microunde
Epoca Întunecată Atomii încep să simtă gravitația rețelei cosmice de materie întunecată
Primele stele Primele stele și galaxii se formează în nodurile cele mai dense ale rețelei cosmice
Evoluția galaxiilor
Universul actual
• Minuscule fluctuații: semințele viitoarelor structuri
• Unde gravitaționale?
Frecvente ciocniri între materia normală și lumină
Pe măsură ce universul se extinde, particulele se ciocnesc mai rar
Lumina nu mai e împrăștiată de electroni → Polarizare
Universul e întunecat până la formarea stelelor și galaxiilor
Lumina primelor stele și galaxii sparge atomii și „reionizează" universul
Lumina poate interacționa din nou cu electronii → Polarizare

Figura 3. (a) *O reprezentare tipică a expansiunii universului de la big bang până în prezent.*

www.esa.int
Agenția Spațială Europeană

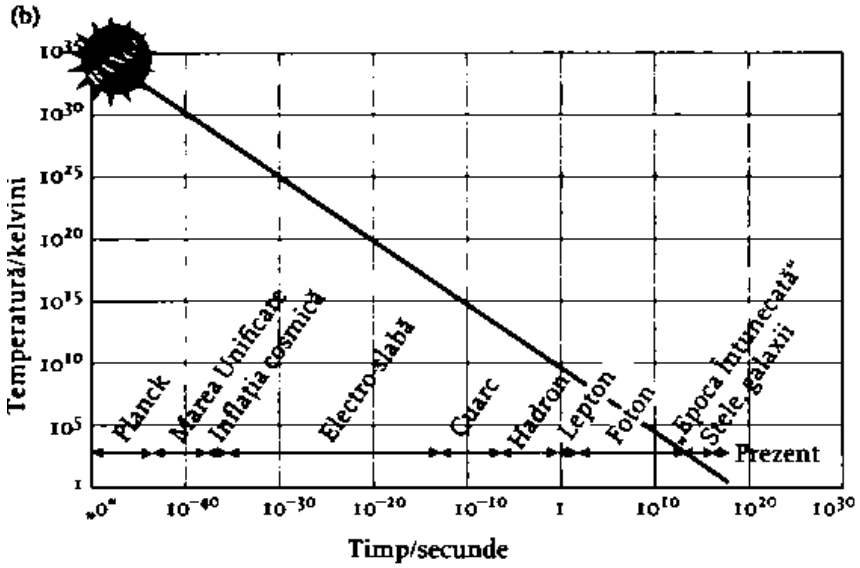


Figura 3. *(b) Pe măsură ce se extinde, universul se răcește. Temperatura medie definește și delimitează o serie de „epoci" în care natura forțelor și particulelor se schimbă. Observați că atât scara timpului, cât și cea a temperaturii sunt logaritmice, crescând în ordine de mărime, ceea ce pune în evidență primele momentele din evoluția universului.*

Epoca Planck: de la „zero" la 10^{-43} secunde

Am explicat de ce știința nu poate oferi o descriere definitivă a big bang-ului în chiar primele sale momente. Dacă extrapolăm înapoi în timp folosind relativitatea generală, ajungem la o *singularitate,* o situație neplăcută în care apar valori infinite – semn că am împins teoria dincolo de domeniul ei aplicabilitate. Teoria pur și simplu n–o poate trata. Ar trebui să rezolvăm problema încorporând și teoria cuantică, iar până acum nu s-a ajuns la un consens în privința felului în care trebuie procedat.

Dar ce anume *credem* că s-ar fi putut întâmpla? Să ne amintim că la big bang sunt create spațiul, timpul și energia, adică tot ce există, cel puțin în universul *nostru.* Nu avem o teorie care să se aplice la momentul big bang-ului, dar putem încerca să ghicim ce s-a întâmplat la scurt timp după aceea extrapolând proprietățile universului așa cum ne apare nouă azi.

De la magazinul din apropiere cumpăr deseori gheață care se vinde în pungi de plastic și cântărește câteva kilograme. Cuburile de gheață au aproximativ aceeași dimensiune, dar tind să se lipească unele de altele și sunt greu de separat. Să presupunem că golesc conținutul pungii într-

o cratiță mare. Grămada de gheață e amestecată – nu e nici uniformă, nici simetrică. Arată diferit din direcții diferite: blocuri mai mici într-o parte, blocuri mai mari în alta. Această neuniformitate persistă și la nivelul microscopic al moleculelor din care e alcătuită gheața. Moleculele formează o rețea cristalină care arată diferit din direcții diferite. Există o diferență între direcțiile sus–jos, stânga–dreapta și față–spate.

Ce se întâmplă dacă pun cratița pe aragaz și o încălzesc? E simplu. Cuburile și blocurile de forme diferite încep să se topească. Curând, am în cratiță un volum de apă lichidă mult mai uniform (și mult mai simetric și mai omogen). La nivel microscopic, rețeaua cristalină e înlocuită de molecule de apă care se mișcă încoace și încolo, dar sunt legate între ele în rețele pe distanțe scurte. E mult mai greu să observăm diferențele dintre direcțiile sus–jos, stânga–dreapta și față–spate.

Acopăr acum cratița cu un capac etanș, așa încât nimic să nu iasă afară. Dacă continui s–o încălzesc, în cele din urmă lichidul va fierbe, iar distribuția aburului (a vaporilor de apă) din cratiță va fi și mai uniformă (și simetrică). La nivel microscopic, moleculele individuale de apă trec în mare viteză unele pe lângă altele sau se ciocnesc, iar rețelele pe distanțe scurte dispar. A devenit imposibil să distingem între sus–jos, stânga–dreapta și față–spate. Vaporii arată la fel din toate direcțiile.

Scenariul nu e foarte diferit de felul în care ne închipuim că s-ar comporta bucățile de univers dacă l-am putea încălzi la temperaturile existente la scurt timp după big bang. Marea diversitate de particule și forțe care modelează universul nostru e de așteptat să dispară pe măsură ce ele devin tot mai omogene și mai simetrice. Azi avem de-a face în natură cu patru forțe. Am întâlnit deja gravitația, care acționează la scara obiectelor mari, cum sunt paharele, cărțile, planetele și stelele. Celelalte trei forțe acționează la scara microscopică a moleculelor, atomilor și particulelor subatomice.

Există două tipuri de particule subatomice, numite cuarci și leptoni. Cuarcii au trei tipuri de proprietăți: sarcină electrică, culoare și aromă.[18] Forța nucleară tare acționează asupra culorii cuarcului și e transmisă de la un cuarc la altul prin intermediul unor particule de

masă nulă numite gluoni. Forța nucleară slabă acționează asupra aromei cuarcului, iar cea mai cunoscută manifestare a ei apare în dezintegrarea radioactivă beta. Forța nucleară slabă e transmisă prin „fotoni grei" numiți particule W și Z, care sunt în număr de trei: W+, W– și Z°. Cuarcii de diferite culori și arome se combină pentru a forma protoni și neutroni, despre care se credea la un moment dat că sunt particule elementare.

A patra forță, electromagnetismul, ne e destul de bine cunoscută – este forța dintre particulele încărcate electric, cum sunt protonii și electronii, transmisă de fotoni, particulele care alcătuiesc lumina. E forța pe care o simți când încerci să apropii polii nord a doi magneți. E de asemenea forța pentru care plătești factura la electricitate.

Dacă încălzim particulele și forțele care acționează asupra lor până la o temperatură suficient de înaltă, unii fizicieni cred că vom obține o singură particulă și o singură forță primordială – forțele electromagnetică, slabă, tare și, în cele din urmă, cea gravitațională se vor „contopi".

Dacă acest scenariu e corect, atunci prima perioadă din viața universului e caracterizată prin apariția spontană a spațiului–timp și a energiei (deși nu e dar dacă în această etapă există vreo diferență între ele), guvernate de o unică forță universală primordială. E tentant să definim asta ca un fel de timp zero absolut, momentul în care ceasul începe să ticăie, numai că timpul însuși e creat atunci. Prin urmare, „timpul zero" nu e bine definit și există o oarecare ambiguitate când vorbim despre timp „după big bang".

Temperatura universului din aceste prime momente e incalculabilă (temperatura ca mărime fizică n-are sens aici). Dar universul se extinde și se răcește. Se extinde de la un punct infinit mic (deci imposibil de definit)[19] până la ceva la care putem măcar începe să ne gândim. Aceasta e Epoca Planck. Este caracterizată de mărimi ale distanței și timpului deduse prin combinarea unor constante fundamentale ale naturii, combinare datorată fizicianului german Max Planck.[20] Acestea sunt mărimi dincolo de care știința nu poate spune nimic. Teoretic, nu poate exista o distanță mai scurtă decât *lungimea Planck* ($1{,}6\times10^{-35}$ metri) și nicio durată mai scurtă decât *timpul Planck* (5×10^{-44} secunde)

– timpul în care lumina străbate lungimea Planck. Universul se extinde și se răcește până la o temperatură de 1032 K. Spre comparație, temperatura miezului Soarelui este de aproximativ 16 milioane K, deci în acest stadiu incipient al său, universul e de aproximativ 6 bilioane de bilioane de ori mai fierbinte decât centrul Soarelui.

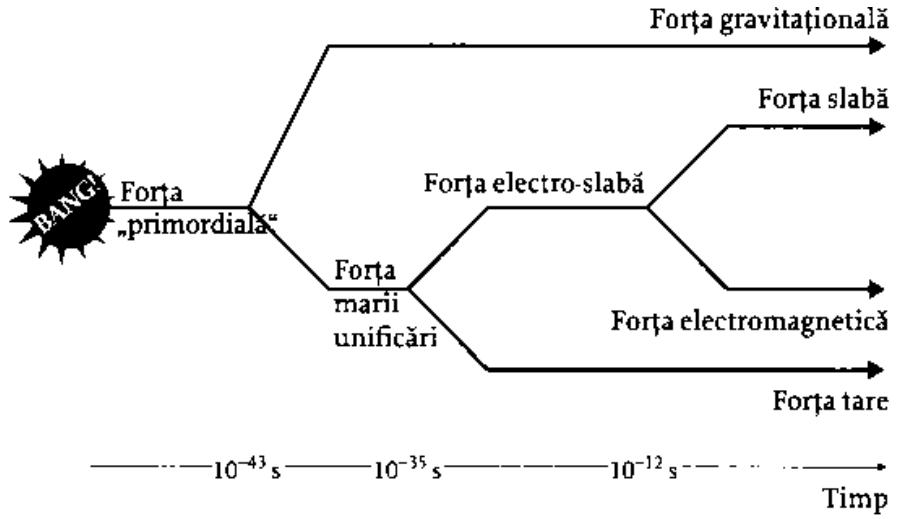


Figura 4. *Se crede că în primele momente ale big bang-ului toate cele patru forțe ale naturii sunt unificate într-o singură forță primordială având o simetrie înaltă. După 10^{-43} secunde, universul suferă o tranziție de fază, iar forța gravitațională se separă.*

Ce se întâmplă în continuare poate fi asemuit cu o *tranziție de fază.* Dacă iau de pe aragaz cratița fierbinte cu vapori, ea se va răci. Răcindu-se, vaporii încep să se condenseze, formând picături de apă care se vor aduna pe fundul cratiței. Moleculele de apă trec din faza gazoasă în faza lichidă, și spunem că simetria e spontan ruptă sau redusă. La fel, când universul timpuriu se apropie de venerabila vârstă de 10^{-43} secunde, forța primordială se „condensează". Ceea ce vom recunoaște mai târziu drept forță gravitațională e separat de o forță unificată „electro–nucleară" alcătuită din forțele nucleare tare și slabă și forța electromagnetică (figura 4). Universul a pornit la drum.

Epoca Marii Unificări: de la 10^{-43} la 10^{-35} secunde

Nu avem deocamdată o teorie acceptată cu care să descriem forța primordială. De asemenea, nu există o teorie acceptată care să descrie forța creată prin unificarea forțelor nucleare tare și slabă și cea electromagnetică. Au existat numeroase încercări de a deduce astfel de

teorii, numite „teorii ale marii unificări” *(grand unified theories* – GUT), dar ele nu sunt în acord cu observațiile experimentale.

Aceste experimente nu re–creează condițiile din ceea ce numim Epoca Marii Unificări de la începutul universului, fiindcă energiile și temperaturile sunt departe de cele pe care le putem obține cu mijloacele de care dispunem. Teoriile marii unificări își lasă însă amprenta asupra particulelor și forțelor care apar *după* această perioadă, și pe care le putem observa azi la energii și temperaturi mai modeste. Până acum nicio GUT n-a oferit predicții în acord cu ce observăm.

Ce conținea acest univers nou creat? Greu de spus. Majoritatea modelelor cosmologice presupun că universul timpuriu se comportă asemănător cu un gaz fierbinte uniform, fără a preciza natura gazului. Dacă există particule, putem presupune că au masă nulă și energii înalte, și că nu seamănă cu particulele pe care le cunoaștem astăzi.

Universul continuă să se extindă și să se răcească până la o temperatură de aproximativ 1027 K. La vreo 10–35 secunde după big bang are loc o nouă tranziție de fază, când forța nucleară tare se condensează și se separă de forța „electro–slabă” reziduală. Dar acum lucrurile se petrec altfel.

Inflația cosmică: de la 10^{-35} la 10^{-32} secunde

În 1979, tânărul cercetător postdoctoral american Alan Guth și colegul să Henry Tye încercau să înțeleagă cosmologia primelor momente după big bang. Ei s-au întrebat ce s-ar fi întâmplat dacă, în loc să sufere o tranziție de fază lină la sfârșitul Epocii Marii Unificări, universul ar fi rămas în faza marii unificări la temperaturi cu câteva ordine de mărime *mai scăzute decât* temperatura de tranziție, ceea ce poartă numele de *suprarăcire.* Asta rezolva într-adevăr problema lor, dar când Guth a studiat efectele mai vaste ale declanșării suprarăcirii, a descoperit că această căldură latentă a universului suprarăcit e înmagazinată în vid, în însuși spațiul–timp. Vă reamintesc că energia vidului face cam același lucru ca termenul cosmologic al lui Einstein: determină creșterea ratei de expansiune a spațiului–timp. Injectarea unei cantități foarte mari de energie în spațiu–timp declanșează o scurtă explozie de expansiune

exponenţială, dublând dimensiunea universului la fiecare 10^{-34} secunde. O sută de asemenea dublări ar fi mărit dimensiunea universului cu un factor de 10^{30}.

„Nu–mi amintesc să fi încercat să dau un nume acestui fenomen extraordinar de expansiune exponenţială", avea să spună Guth, „dar găsesc în jurnalul meu că pe la sfârşitul lui decembrie [1979] începusem să-l numesc *inflaţie*".[21] Guth a găsit că inflaţia cosmică declanşată în acest fel ar trebui să nu se oprească niciodată, însă *ideea* de inflaţie i se părea atât de atrăgătoare încât n-a renunţat la ea. O versiune modificată a modelului numită „rulare lentă" sau „noua inflaţie" oferea posibilitatea unei ieşiri elegante din condiţiile inflaţionare, permiţând ratei de expansiune să revină la valori normale.

E realist acest scenariu? Teoriile inflaţiei cosmice se bazează pe proprietăţile presupuse de teoriile marii unificări, iar dacă nu există o teorie general acceptată a marii unificări, statutul inflaţiei rămâne discutabil. Există totuşi unele caracteristici ale universului observabil care se explică dacă presupunem că a avut într-adevăr loc ceva de genul inflaţiei.

În 1924 Friedmann arătase că presupuneri diferite privind densitatea de masă–energie duc la tipuri diferite de univers. Într-un univers închis, spaţiul–timp are o curbură pozitivă, ca suprafaţa unei sfere. Dreptele paralele se intersectează, iar suma unghiurilor unui triunghi e mai mare de 180^{o}. Într-un univers deschis, spaţiul–timp are o curbură negativă, semănând cu o şa. Şi în acest caz dreptele paralele se intersectează, iar suma unghiurilor unui triunghi e mai mică de 180^{o}.

S-ar părea că trăim într-un univers în care există un echilibru foarte fin între densitatea de masă–energie şi rata de expansiune, aşa încât spaţiul–timp e plat (figura 5). De aceea învăţăm la şcoală geometria euclidiană. Dar de ce ar exista acest echilibru în universul nostru? Oamenii de ştiinţă sunt puşi în dificultate când se confruntă cu dovada unui asemenea reglaj fin, mai ales dacă nu-l pot explica prin mecanisme fizice.

Unii teoreticieni susţin că aici ne vine în ajutor inflaţia. Nu contează care a fost valoarea exactă a energiei conţinute în universul timpuriu

sau dacă densitatea ei a avut valoarea critică necesară pentru a produce un spațiu–timp plat. Nu contează care a fost rata de expansiune inițială. Nu contează nici dacă inflația e aplicată întregului univers timpuriu sau doar unei mici bule de spațiu–timp din acesta. Indiferent de forma spațiului–timp dinaintea inflației, după ce inflația a acționat, spațiul–timp plat e singurul rezultat posibil.[22] Pentru a vă face o imagine, închipuiți–vă suprafața unui balon dezumflat. Ea poate fi încrețită ca o prună uscată, curbată în fel și chip. Umflați balonul, iar încrețiturile sunt imediat netezite. Poate că universul vizibil e plat fiindcă provine dintr-o minusculă parte a universului marii unificări care a fost enorm umflată de inflație.

Teoria inflației are numeroși critici, iar unii au susținut că există modele care nu necesită inflație sau vreun echilibru perfect pentru a se ajunge la un spațiu–timp plat. Inflația rămâne totuși, cel puțin deocamdată, o componentă importantă a teoriei larg acceptate care descrie evoluția universului.

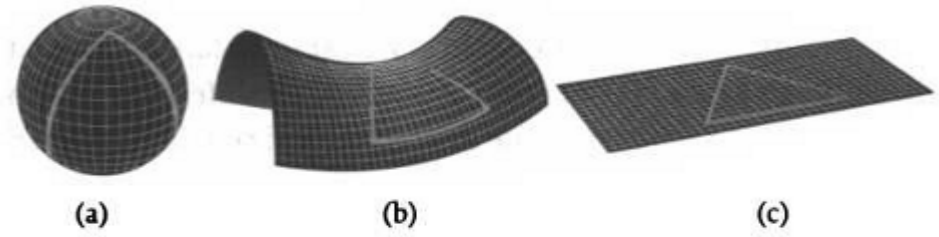


Figura 5. *Diferitele modele de univers identificate de Friedmann în soluțiile ecuațiilor câmpului gravitațional ale lui Einstein produc diferite spații-timp curbate. Universul „închis" are o curbură pozitivă a spațiului-timp, după cum se vede în (a). Universul „deschis" are un spațiu-timp curbat pozitiv, în formă de șa, (b). Un univers cu un reglaj fin între rata de expansiune și cantitatea de masă-energie pe care o conține are un spațiu-timp plat, (c).*

Reîncălzirea

Se crede că inflația a încetat la aproximativ 10^{-32} secunde după big bang. Temperatura e acum cu câteva ordine de mărime mai mică decât temperatura de tranziție. În univers există particule, dar ele ne rămân în mare parte necunoscute. Temperatura acestui univers timpuriu e încă prea ridicată. Deși forța tare s-a separat, nu avem de-a face cu forța tare așa cum se manifestă ea în universul de azi. La fel, particulele existente pot fi considerate în cel mai bun caz precursoarele celor pe

care vom ajunge în cele din urmă să le cunoaștem. Niciuna dintre aceste particule nu are deocamdată masă.

Toate particulele produse înainte de inflație au fost răspândite foarte rarefiat când a avut loc inflația. Dar la fel cum căldura latentă în apa suprarăcită e eliberată în cele din urmă, apa revenind la punctul de îngheț, energia înmagazinată în spațiu–timp e eliberată la sfârșitul perioadei inflaționare. Această energie e investită în crearea unor noi particule, iar pe măsură ce universul se umple, el se reîncălzește până la temperatura de tranziție.

Din motive care cred că au devenit limpezi, evenimentele descrise aici sunt în mare măsură speculații bazate pe ipoteze și extrapolări care ar putea – sau nu – să fie justificate. Înșiruirea prezentată (Epoca Planck, Epoca Marii Unificări, inflația cosmică și reîncălzirea cosmică) se întemeiază pe presupuneri privind temperatura universului de la sfârșitul inflației (ea însăși pur ipotetică). Dacă această temperatură a fost mai mare – și se prea poate să fi fost –, atunci inflația și reîncălzirea se petrec *înainte de* ruperea simetriei marii unificări și de separarea forței tari. Deocamdată nu putem ști.

Haideți totuși să dăm credit acestui scenariu. Universul expandat de inflație are acum vârsta de 10^{-32} secunde, temperatura este de 10^{27} K și e umplut de particule fără masă, precursoarele particulelor pe care vom ajunge să le cunoaștem. El continuă să se extindă, însă într-un ritm mai lent, iar gravitația își săvârșește deja lucrarea. Spațiul–timp a fost aplatizat de procesul inflației și totuși, după cum vom vedea imediat, rămân unele încrețituri minuscule.

Și mai e ceva: există o energie reziduală a vidului despre care nu știm de unde provine. Ar putea fi o energie a vidului rămasă cumva după inflație, sau poate că această cantitate de energie a vidului e o proprietate intrinsecă a spațiului–timp însuși. Indiferent de originea sa, ea acționează ca termenul cosmologic, accelerând delicat rata de expansiune, în timp ce gravitația o frânează, amândouă fiind prinse într-o încleștare cosmică. Pentru moment, densitatea de energie din univers e mare, iar gravitația învinge. Însă energia vidului – pe care o vom numi „energie întunecată” – așteaptă răbdătoare să se manifeste.

2. Ruperea simetriei

Originea masei

Aţi observat fără îndoială că am fost precaut în privinţa naturii particulelor care umpleau universul în primele 10–32 secunde de existenţă. De fapt, am fost precaut în privinţa multor lucruri. Capacitatea noastră de a înţelege aceste prime momente din viaţa universului e drastic limitată de inadecvarea teoriilor noastre ştiinţifice atunci când sunt extrapolate la condiţiile care credem că existau atunci. Nu disperaţi însă. Odată ajunşi la sfârşitul următoarei epoci, la o bilionime de secundă după big bang, ne vom afla pe un teritoriu mai familiar şi mai confortabil.

Înainte de a continua, e nevoie să înţelegem mai bine particulele care vor juca un rol decisiv în apariţia noastră şi a lumii din jurul nostru. Nu ştiu exact la ce vă gândiţi când folosesc cuvântul „particulă", dar pe când eram mai tânăr (şi mai naiv) îmi închipuiam o minusculă bucată de materie, „substanţa" din care totul e alcătuit, cam aşa cum concepeau filosofii din Grecia antică ideea de „atom". Fără prea multă imaginaţie, îmi reprezentam aceste „particule" ca mici sfere solide incompresibile şi indivizibile, ciocnindu-se unele de altele ca nişte bile de biliard microscopice. Dacă vă închipuiţi ceva asemănător, aflaţi că sunteţi departe de adevăr.

Natura particulelor cuantice

Fizicienii din primele decenii ale secolului XX au trăit un imens şoc intelectual. Ei au descoperit că particulele microscopice care alcătuiesc atomii şi moleculele – constituenţii din care e format totul în lumea noastră – se comportă ciudat. În anumite condiţii, aceste particule se comportă aşa cum ne-am imaginat în naivitatea noastră: ca bucăţi de materie urmând traiectorii bine definite prin spaţiu. Dar în alte condiţii, aceleaşi particule se comportă ca perturbaţii ondulatorii, cu creste şi văi deplasându-se ca micile valuri care se răspândesc pe suprafaţa unui lac când arunci o piatră. Fenomenul se numeşte *dualitate undă–particulă.* Nu veţi fi pesemne surprinşi să aflaţi că cercetările care au condus la această idee au fost iniţiate de Einstein în 1905.

Pe Einstein îl preocupa natura luminii. Deși Newton crezuse că lumina e alcătuită din particule minuscule (numite de el „corpusculi”), pe la 1905 dovezile științifice demonstrau limpede existența undelor luminoase. De pildă, când trece printr-o fantă îngustă, un fascicul de lumină diverge – fenomen cunoscut sub numele de difracție. Acest comportament e greu de înțeles dacă presupunem că lumina e alcătuită din particule supunându-se legilor de mișcare ale lui Newton și deplasându-se în linii drepte. E mult mai ușor de înțeles dacă presupunem că lumina e compusă din unde.

Lumina prezintă și fenomenul de interferență. Un fascicul care cade pe două fante înguste va fi difractat de ambele. Unda care se răspândește dincolo de fiecare fantă se comportă ca și cum ar proveni dintr-o sursă „secundară” de lumină, iar cele două seturi de unde se

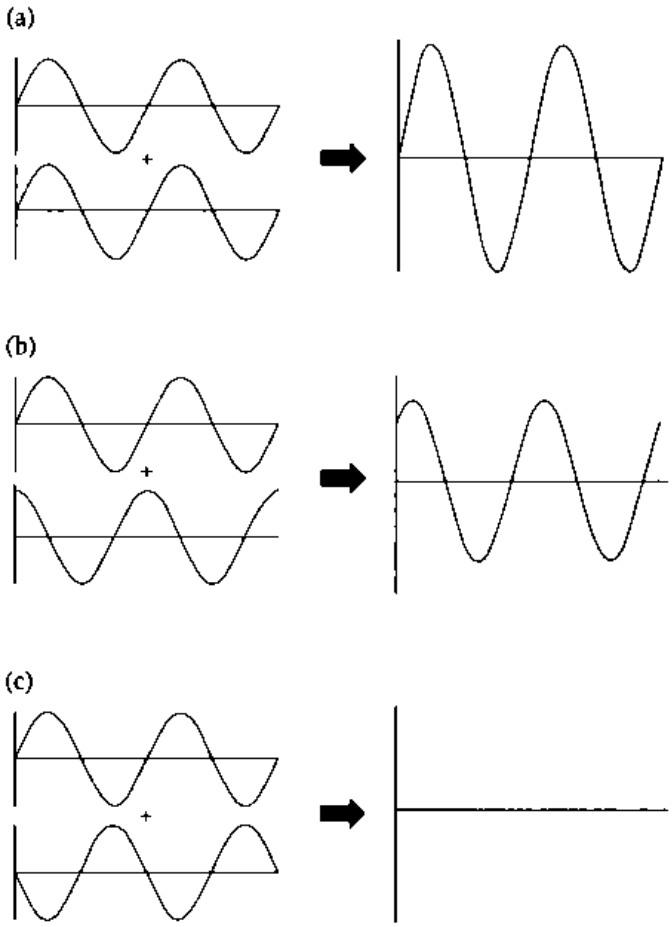


Figura 6. *Când sunt aliniate, ca în (a), două unde se însumează și se întăresc reciproc. Aceasta e interferența constructivă. Când undele nu mai sunt aliniate, amplitudinea scade, ca în (b). Când undele sunt în completă opoziție, rezultatul e interferența distructivă, (c).*

suprapun. Acolo unde creasta unei unde întâlnește creasta celeilalte, rezultatul e interferența constructivă: undele se întăresc reciproc pentru a produce o creastă mai înaltă. Acolo unde valea întâlnește valea, rezultatul e o vale mai adâncă. Dar acolo unde creasta întâlnește valea, rezultatul e interferența distructivă: undele se anulează reciproc (figura 6). Rezultatul e o succesiune de benzi luminoase și întunecate numite franje de interferență, care pot fi observate pe un film fotografic (figura 7). Benzile luminoase sunt produse prin interferență constructivă, iar benzile întunecate prin interferență distructivă.

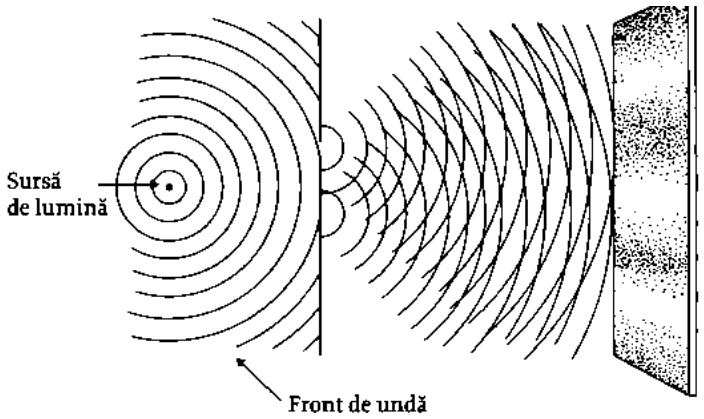


Figura 7. *Când trece prin două fante înguste apropiate, lumina produce un model de franje luminoase și întunecate. Acest fenomen poate fi explicat prin teoria ondulatorie a luminii, în care undele care se suprapun interferă constructiv (dând naștere unei franje luminoase) și destructiv (franjă întunecată).*

Dar undele sunt perturbări *în* ceva. Aruncând o piatră într-un lac, produci o perturbare a suprafeței apei, iar undele *din apă* sunt cele care încrețesc lacul. Și atunci, ce anume perturbă undele luminoase? Fizicienii din secolul XIX și de la începutul secolului XX susțineră că acestea sunt unde într-o formă fină de materie numită eter, care se presupunea că impregnează întregul univers. Nu s-a găsit însă nicio dovadă experimentală în favoarea existenței eterului.

Așa cum n-a crezut că spațiul și timpul sunt absolute, Einstein n-a crezut nici în eter. El a susținut că cercetările din 1900 ale fizicianului german Max Planck sugerau o cu totul altă interpretare pentru lumină. Planck ajunsese la concluzia că putem trata lumina *ca și cum* ar fi absorbită și emisă de materie în unități discrete sau „pachete" de energie numite de el *cuante.* Einstein susținea că asta se întâmplă pentru că lumina e într-adevăr *compusă* din cuante.

Einstein n-a revenit pur și simplu la corpusculii lui Newton. Nimeni nu nega dovezile în favoarea comportamentului ondulator, cum sunt difracția și interferența. În articolul său, Einstein a păstrat frecvența în descrierea a ceea ce el numea „cuante de lumină", iar frecvența e o proprietate a undelor (numărul de oscilații ale unei unde de la un vârf la vale și înapoi în unitatea de timp). Dar cum pot cuantele sau „particulele" de lumină să fie în același timp și unde? Particulele sunt prin definiție bucăți de materie localizate – ele sunt „aici" sau „acolo". Undele sunt perturbări delocalizate într-un mediu, ele sunt

„pretutindeni", răspândind perturbarea. Cum pot fi aceste cuante de lumină aici, acolo *şi* pretutindeni?

Acestea erau idei extrem de speculative, iar fizicienii nu s-au grăbit să le accepte. Einstein a folosit însă ipoteza cuantei de lumină pentru a prezice un fenomen numit efect fotoelectric, predicţie confirmată zece ani mai târziu de experimentele fizicianului american Robert Millikan. În 1921 Einstein a primit Premiul Nobel pentru Fizică pentru această contribuţie, deşi ipoteza cuantei de lumină rămânea oarecum controversată.

Doi ani mai târziu, fizicianul american Arthur Compton şi teoreticianul olandez Pieter Debye au arătat că lumina putea „ricoşa" de pe electroni schimbându–şi frecvenţa. Aceste experimente dovedesc dar că lumina e într-adevăr constituită din particule care se deplasează pe traiectorii, ca nişte mici proiectile. Treptat, ideea de cuantă de lumină a început să fie acceptată. Chimistul american Gilbert Lewis a născocit termenul „foton" în 1926. Dar povestea nu se încheie aici. În 1923 prinţul Louis de Broglie[23], fiul mai mic al lui Victor, al cincelea duce de Broglie, a lansat o ipoteză uimitoare:[24]

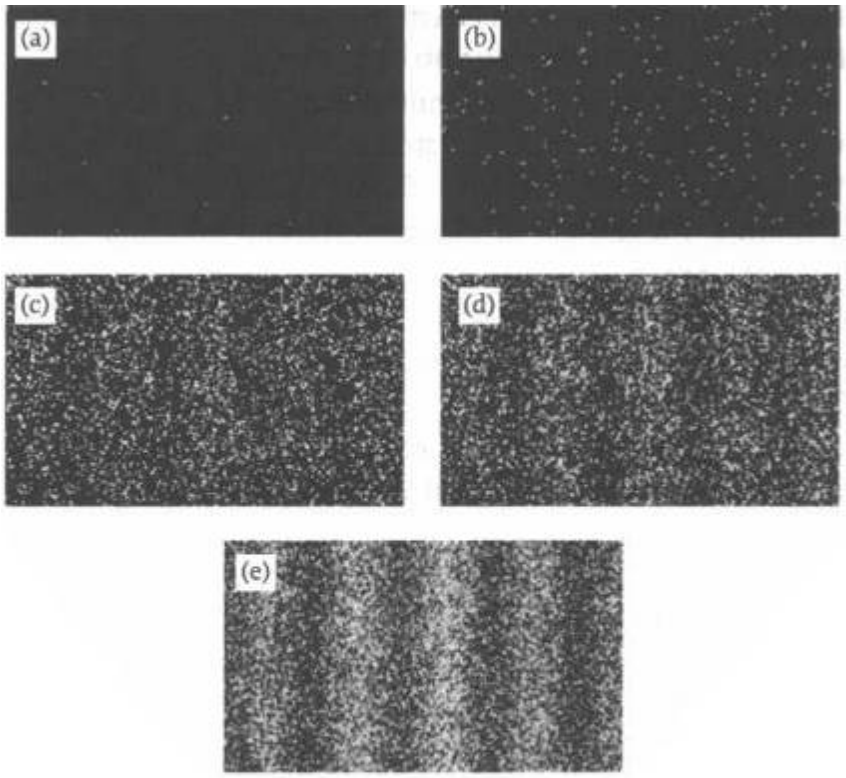
În 1923, după ce am reflectat îndelung în singurătate, mi-a venit brusc ideea că descoperirea lui Einstein din 1905 trebuie generalizată extinzând–o la toate particulele materiale, şi mai ales la electroni.

Dacă undele luminoase cu o anumită frecvenţă caracteristică prezintă proprietăţi corpusculare, atunci, s-a gândit de Broglie, poate că particule cum sunt electronii, cu o anumită masă caracteristică, pot prezenta proprietăţi ondulatorii.

De Broglie sugera că, în anumite condiţii, electronul se putea comporta ca o perturbare oscilatorie. Asta însemna că, în principiu, un fascicul de electroni ar fi difractat, la fel ca un fascicul de lumină. Un fascicul de electroni trecând prin două fante apropiate ar produce interferenţă. Părea de-a dreptul ciudat: cum ar putea prezenta efecte de interferenţă o particulă bine definită, având masă? Mai mult, închipuiţi–vă ce s-ar întâmpla dacă am limita intensitatea fasciculului de electroni aşa încât, în medie, să treacă pe rând câte un *singur* electron prin fante. Detectăm

electronii de cealaltă parte a dispozitivului, pe un film fotografic. Ce ne-am aştepta să vedem?

Instinctul ne spune că fiecare electron *trebuie* să treacă fie printr-o fantă, fie prin cealaltă. În fond, se presupune că e o *particulă* elementară, o bucată indivizibilă de substanţă materială, cu sarcină electrică negativă. În naivitatea noastră, ni s-ar părea imposibil ca asemenea particule să producă interferenţă. Şi, într-adevăr, când efectuăm experimentul constatăm că un singur electron trecând prin fante produce o pată – şi una singură – pe filmul fotografic. Exact ce spuneam.



Putem observa electronii când trec, unul câte unul, printr-un dispozitiv cu două fante, înregistrând locul unde lovesc filmul fotografic. Fiecare pată albă indică punctul unde un electron individual e detectat. Fotografiile (a)–(e) prezintă imaginile rezultate când au fost detectaţi 10, 100, 3 000, 20 000 şi, respectiv, 70 000 de electroni. Modelul de interferenţă devine tot mai clar pe măsură ce creşte numărul electronilor detectaţi.

Dar staţi. Dacă lăsăm mai mulţi electroni să treacă prin fante, unul câte unul, se adună tot mai multe pete – şi apare modelul de interferenţă (figura 8). Asemenea rezultate experimentale nu pot fi înţelese decât dacă acceptăm că fiecare electron se comportă ca o undă, trecând prin

ambele fante. Când unda rezultată atinge filmul fotografic, ea „colapsează", într-o manieră aparent aleatorie, pentru a produce o sigură pată. Însă probabilitatea de a produce o pată e mult mai mare acolo unde amplitudinea undei a crescut prin interferenţă constructivă, şi mult mai mică acolo unde amplitudinea a fost anulată prin interferenţă distructivă. Ideea şocantă a lui de Broglie reprezintă unul dintre fundamentele pe care a fost clădită teoria cuantică în anii 1920 şi 1930.

Cum să interpretăm acest comportament? Adevărul e că nu prea ştim. Ceea ce ştim este că acest comportament de tip ondulator e caracterizat printr-o mărime numită *fază*, pe care toate particulele cuantice o posedă. Într-un anume sens, faza unei unde este poziţia ei în ciclul creastă–vale. Priviţi figura 6. Undele din (a) sunt aliniate, adică „în fază". În (b) sunt puţin defazate (cu 90°). În (c) sunt în completă opoziţie (defazate cu 1800). Din punct de vedere practic însă, faza unei particule cuantice nu poate fi observată direct. Măsurătorile dezvăluie doar proprietăţile care sunt influenţate de fază, nu faza în sine. Oricare ar fi originea ei, faza determină comportamentul observat pe care îl interpretăm în termeni ondulatori, ceea ce ne ajută, dar nu ne duce mai departe.

Teoreticianul olandez Niels Bohr şi cel german Werner Heisenberg susţineau că particulele şi undele sunt doar proiecţii vagi ale unei realităţi inaccesibile în lumea empirică a măsurătorii şi percepţiei. Ei spuneau că n-are sens să facem speculaţii în legătură cu ce simt fotonii şi electronii *în realitate.* E mai bine să ne concentrăm asupra felului în care apar aceste particule cuantice – într-un tip de experiment ele apar ca unde, în altul ca particule. Această situaţie a fost limpede rezumată de dramaturgul Tom Stoppard în piesa *Hapgood* din 1988:[25]

Repetăm deci [experimentul] exact la fel, de data asta însă fără să urmărim traiectoria gloanţelor [de lumină], iar tiparul ondulator reapare. Încercăm iarăşi urmărind–o, şi avem tiparul corpuscular. De fiecare dat când nu privim, obţinem tiparul ondulator. De fiecare dată când căutam să vedem cum obţinem tiparul ondulator, obţinem tiparul corpuscular. Actul observării determină realitatea.

Abordarea lui Bohr și Heisenberg (și a fizicianului austriac Wolfgang Pauli) se numește *interpretarea Copenhaga*, după orașul unde Bohr a înființat un institut de fizică în care a fost intens discutată interpretarea teoriei cuantice în anii 1920 și la începutul anilor 1930. Desigur, nu toți sunt mulțumiți de această interpretare, iar disputele se poartă de aproape o sută de ani.

Câmpurile și forțele cuantice

Dezbaterea privind interpretarea va continua probabil multă vreme, dar adevărul empiric al dualității undă–particulă e incontestabil. În fizica teoretică contemporană acest aspect al naturii particulelor cuantice elementare (cum sunt fotonii și electronii) e conținut într-o structură numită *teoria cuantică de câmp relativistă* – „relativistă", fiindcă teoria se conformează cerințelor relativității speciale a lui Einstein.[26]

Există multe tipuri de „câmpuri" în fizică. Orice proprietate fizică ce poate fi măsurată în diferite puncte din spațiu și timp poate fi reprezentată ca un câmp. De pildă, dacă măsurăm sistematic (și instantaneu) temperatura și presiunea atmosferică la intervale spațiale fixate de la nivelul solului până în straturile superioare ale atmosferei, în întreaga lume, putem folosi datele pentru a defini „câmpuri" sferice ale temperaturii și presiunii în jurul Pământului și pentru a le urmări cum se modifică în timp. Temperatura și presiunea nu sunt însă proprietăți fizice fundamentale, ci proprietăți secundare, rezultând din densitatea și energia de mișcare a moleculelor de oxigen, azot și gaze rare (în cantități mici) din atmosferă.

Câmpurile cuantice sunt în schimb câmpuri fundamentale. Din câte știm, ele nu rezultă din vreo proprietate mai profundă. Aceste câmpuri pot părea misterioase, dar ele ne sunt familiare. Presărați pilitură de fier pe o foaie de hârtie ținută deasupra unui magnet în formă de bară. Pilitura de fier se așază de-a lungul „liniilor de forță" ale câmpului magnetic, reflectând intensitatea câmpului și direcția lui, întinzându-se de la polul nord la polul sud (figura 9). Câmpul există în spațiul „gol" din afara barei de material magnetic. De fapt, forțele magnetice nu pot fi separate de forțele electrice, iar acest experiment de școală ilustrează

în mod surprinzător anumite aspecte ale câmpului cuantic electromagnetic.

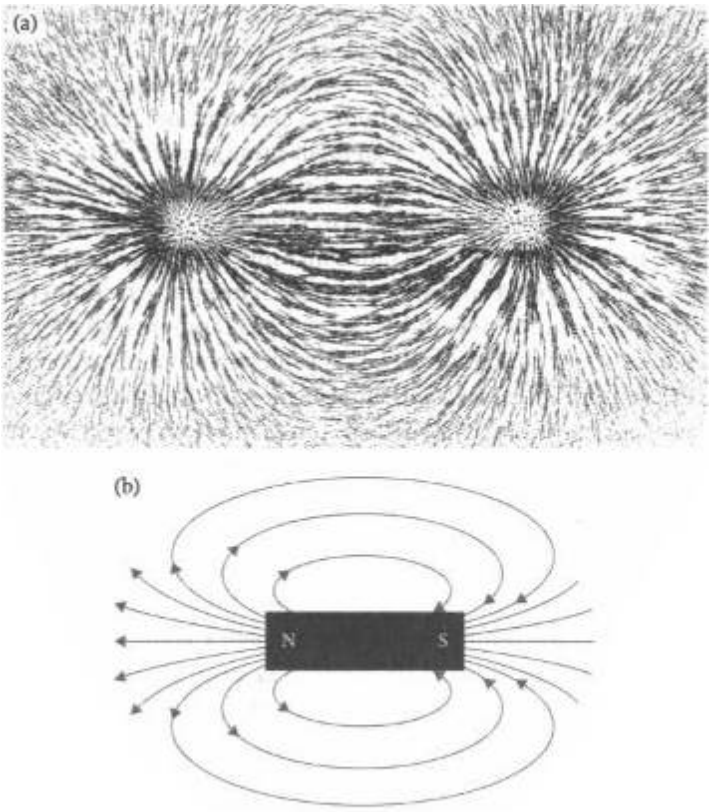


Figura 9. *(a) Pilitura de fier presărată pe o foaie de hârtie sub care se află un magnet în formă de bară dezvăluie „liniile de forță" ale câmpului magnetic întinzându-se de la polul nord la polul sud. (b) Tiparul „liniilor de forță" e prezentat schematic aici. Prin convenție, liniile de forță „curg" de la polul nord la polul sud.*

Natura câmpurilor depinde de natura proprietăţilor care sunt măsurate. Câmpul poate fi *scalar*, însemnând că are mărime, dar nu acționează într-o direcție anume din spațiu – nu trage, nu împinge. Câmpul poate fi de asemenea *vectorial*, având și mărime, și direcție, cum sunt câmpul electromagnetic sau vechiul câmp gravitațional newtonian. În fine, poate fi *tensorial,* o versiune mai sofisticată a câmpului vectorial, pentru situații în care geometria e mai complicată decât bine cunoscuta geometrie euclidiană. Câmpurile tensoriale apar în ecuațiile relativității generale.

În teoria cuantică a câmpului, „particula" este, în esență, un câmp cuantic fundamental, o fluctuație elementară, o perturbație sau o vibrație a câmpului. De pildă, electronul e cuanta câmpului electronic, iar fotonul e cuanta câmpului electromagnetic. Fizicienii care lucrau la

primele versiuni ale teoriei cuantice de câmp și-au închipuit într-un mod foarte diferit felul în care acționează particulele cuantice. Să ne imaginăm că ciocnim doi electroni (termenul tehnic e „împrăștiere"). Putem presupune că atunci când electronii se apropie unul altul în spațiu și timp, ei simt forța reciprocă de respingere generată de sarcinile lor electrice negative.

Dar cum anume? Ne-am putea închipui că fiecare electron în mișcare generează un câmp electromagnetic, iar respingerea reciprocă e simțită în spațiul unde cele două câmpuri se suprapun, la fel ca atunci când încercăm să apropiem polii nord a doi magneți. Dar în domeniul cuantic câmpurile sunt asociate de asemenea cu particule, iar câmpurile în interacțiune cu particulele în interacțiune. În 1932, fizicienii Hans Bethe și Enrico Fermi au sugerat că exercitarea forței e rezultatul *schimbului* unui foton între cei doi electroni.

Pe măsură ce doi electroni se apropie unul de altul, ei ajung la o anumită distanță critică și schimbă între ei un foton, iar astfel particulele resimt forța electromagnetică. Fotonul schimbat transportă un impuls de la un electron la altul, modificând deci impulsul ambelor particule. Rezultatul e un recul, cei doi electroni modificându–și viteza și direcția și îndepărtându-se unul de altul.

Fotonul schimbat e un foton „virtual", fiindcă e transmis direct între cei doi electroni și nu-l vedem trecând de la unul la altul. De fapt, nici nu se poate spune în ce direcție se deplasează fotonul. În diagrama care reprezintă interacțiunea, drumul fotonului virtual este ilustrat printr-o linie ondulată, fără a fi indicată vreo direcție între electroni (figura 10).[27] Iată încă o descoperire. Fotonul nu mai era doar cuanta câmpului electromagnetic, ci devenea și „purtătorul" forței electromagnetice. Când încercăm să apropiem polii nord a doi magneți, rezistența pe care o simțim e rezultatul fotonilor virtuali care sunt schimbați între magneți.

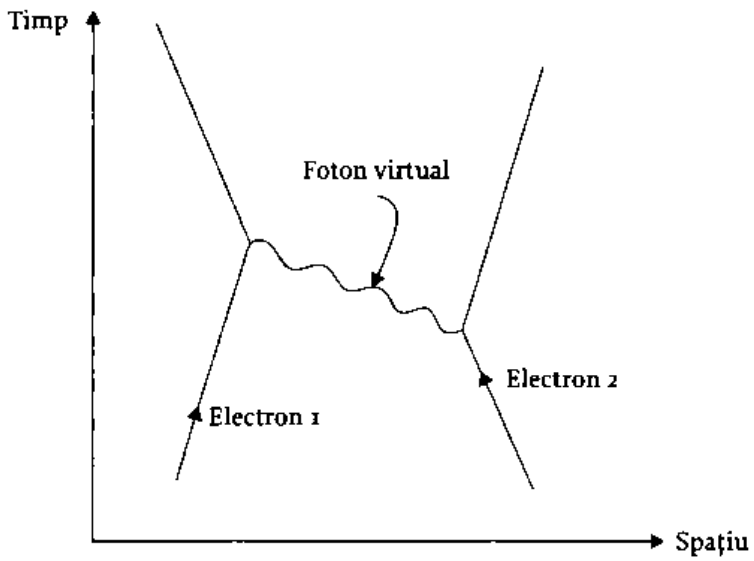


Figura 10. *Această diagramă simplă reprezintă interacțiunea dintre doi electroni. Mișcarea lor în spațiu-timp e redusă la o singură dimensiune spațială (axa x) și o dimensiune temporală (axa y). Forța electromagnetică de respingere între doi electroni cu sarcină negativă implică schimbul unui foton virtual în punctul de minimă apropiere. Fotonul este „virtual" deoarece nu e vizibil în timpul interacțiunii.*

Spinul

Pentru cele ce urmează ne va fi util să explorăm mai amănunțit proprietățile particulelor cuantice. În plus față de faptul că posedă energie (legată direct de frecvența undei),[28] fotonii sunt caracterizați și prin momentul lor cinetic intrinsec, numit de fizicieni *spin.* În mecanica newtoniană, asociem momentul cinetic cu obiecte care se învârt în jurul unui ax central. De fapt, când urmărim un patinator învârtindu-se tot mai repede la sfârșitul numărului său, vedem în acțiune legea conservării momentului cinetic.

Evident, asta nu se aplică fotonilor, fiindcă fotonii n-au masă: nu există un ax central în jurul căruia să se învârtă și nu se pot învârti mai repede sau mai încet. De fapt termenul de „spin" e înșelător[29], e o rămășiță de la începuturile teoriei cuantice, când se credea că această proprietate se datorează unei „autorotații" intrinsece, particulele cuantice învârtindu-se ca un titirez. S-a văzut imediat că acest lucru e imposibil, dar termenul „spin" a rămas.

N-are rost să cercetăm mai îndeaproape spinul și să ne întrebăm ce face în realitate fotonul, ceea ce știm este că această proprietate se

manifestă ca un moment cinetic. Interacţiunile dintre fotoni şi materie sunt guvernate de conservarea momentului cinetic, fapt confirmat de numeroase experimente efectuate de-a lungul anilor. Când creăm un fascicul intens de fotoni (un fascicul laser) cu spinii fotonilor aliniaţi, momentele cinetice ale tuturor fotonilor individuali se însumează, iar fasciculul capătă un moment al forţei măsurabil. Dacă e îndreptat asupra unei ţinte, aceasta se va roti.

Fizicienii au caracterizat proprietăţile de spin ale particulelor cuantice printr-un *număr cuantic de spin*, care măsoară momentul cinetic intrinsec al particulelor. Acest număr cuantic poate lua valori semi–întregi (1/2, 3/, etc.) sau întregi (0, 1, 2, etc.). Particulele cuantice cu spin semi–întreg se numesc *fermioni,* după fizicianul italian Enrico Fermi. Dacă împingem mai departe analogia cu titirezul, găsim că fermionii ar trebui să se învârtă *de două ori* în jurul axei lor pentru a se întoarce de unde au pornit (ceea ce arată ce dificultăţi generează analogiile clasice în lumea cuantică). Fotonul are numărul cuantic de spin 1, adică e *boson*, după numele fizicianului indian Satyendra Nath Bose. Se dovedeşte că particulele cuantice din care e compusă materia – cuarci şi leptoni – sunt cu toate fermioni. Particulele care transportă forţele dintre particulele de materie sunt bosoni. Particulele asociate câmpurilor cuantice scalare sunt bosoni de spin zero. Cred că deocamdată e de-ajuns. Dar unde rămăsesem?

Epoca electro–slabă: de la 10^{-23} la 10^{-12} secunde

În urma scurtei inflaţii cosmice, energia latentă stocată sub formă de energie a vidului în spaţiu–timp e eliberată, umplând universul cu particule de masă zero şi reîncălzindu-l până la temperatura de tranziţie de 10^{27} K. Apoi, universul se extinde şi se răceşte continuu. Ne aflăm acum în epoca electro–slabă. Forme distorsionate, de energie înaltă, ale gravitaţiei, forţei tari şi forţei combinate electro–slabe predomină printre câmpurile cuantice cu particule care sunt precursorii celor din prezent. Toate aceste particule au masă nulă. Deocamdată nu există fotoni.

Această situaţie persistă până când universul are vârsta de o bilionime de secundă şi s-a răcit până la temperatura de 10^{15} K. Aici apare o altă tranziţie de fază. Forţa slabă se separă de electromagnetism şi ajungem

la cele patru forțe, particulele asupra cărora acționează ele și particulele care le transportă – cam așa cum le știm astăzi. Și totuși există o diferență.

Ruperea spontană a simetriei

Celălalt lucru asupra căruia am trecut mai repede în ultimul capitol este natura exactă a mecanismului fizic responsabil pentru declanșarea tranzițiilor de fază, mecanism numit „ruperea spontană a simetriei". Amintiți-vă că în experimentul meu de bucătărie cu cratița umplută cu gheață am văzut că, la creșterea temperaturii, gheața se transformă în apă, iar apoi apa se transformă în abur. În fiecare dintre aceste tranziții de fază simetria crește: gheața e mai puțin simetrică decât apa (arată diferit în direcții diferite), apa e mai puțin simetrică decât aburul. Pe măsură ce trecem prin aceste faze diferite, de la gheață la apă și la abur, simetria crește. Când procesul e inversat, aburul se condensează în apă, iar apa îngheață. La fiecare tranziție de fază simetria se reduce sau se „rupe". Această rupere a simetriei are loc spontan când temperatura scade.

Acestea sunt exemple de rupere spontană a simetriei din viața de zi cu zi. Iată acum un exemplu mai neobișnuit. Ne putem imagina că, având suficientă răbdare, am putea ține în echilibru un creion sprijinit în vârful lui. Am vedea atunci că situația e extrem de simetrică, dar și extrem de instabilă. Creionul vertical arată la fel din toate direcțiile din jurul lui. Perturbații minuscule din mediul imediat înconjurător, cum ar fi mici curenți de aer, sunt însă de ajuns pentru a răsturna creionul. Când acest lucru se întâmplă, creionul cade într-o direcție anume, deși aparent aleatorie. Creionul orizontal nu mai arată acum la fel din toate direcțiile. Simetria e ruptă spontan.

În acest exemplu, *mediul* în care creionul stă vertical (mai exact, curentul de aer abia detectabil din acest mediu) e cel care declanșează tranziția. Într-un mod asemănător, micile neomogenități din mediul cratiței oferă centri în jurul cărora picăturile de apă se condensează din vapori, iar cristalele de gheață se formează din apă. Dar, v–ați putea întreba, ce anume din mediul universului declanșează tranzițiile de fază care credem că au avut loc în primele momente ale universului?

Fizicienii au înțeles că trebuiau să adauge ceva la mediul de fond al universului, prin care să se poată face o distincție, iar astfel să fie ruptă simetria câmpurilor cuantice la diferite momente, pe măsură ce universul se răcea. Poate că nu întâmplător ei au ajuns la mai multe câmpuri cuantice. Numai că aici apare o problemă. Câmpurile cuantice asociate cu tipurile de particule pe care le cunoaștem sunt nule în spațiul „gol", definit pur și simplu ca spațiul lipsit de particule.[30] Era nevoie de un tip special de câmp cuantic scalar, care să nu se anuleze, un câmp care se fixează cu încăpățânare la o anumită valoare, în fiecare punct din spațiu–timp. Despre un asemenea câmp se spune că are o valoare medie nenulă în vid.

Ideea de a folosi un câmp cuantic scalar pentru a rupe simetria a apărut la începutul anilor 1960 (fără să fi avut drept scop descrierea istoriei timpurii a universului). Geneza ei e destul de complicată și se leagă de cercetările teoreticienilor Yoichiro Nambu, american de origine japoneză, și Jeffrey Goldstone, britanic, precum și de observațiile fizicianului american Philip Anderson. În 1964, mai multe articole prezentând un anumit tip de mecanism au fost publicate independent de fizicienii belgieni Robert Brout și François Englert, englezul Peter Higgs de la Universitatea din Edinburgh și americanii Gerald Guralnik și Carl Hagen împreună cu Tom Kibble de la Colegiul Imperial din Londra. Din 1972, mecanismul a fost numit mecanism Higgs, iar câmpurile scalare câmpuri Higgs.[31]

Cu o excepție. Câmpul scalar considerat a fi responsabil pentru declanșarea inflației cosmice a fost numit „câmp inflaționar". Acestea erau doar invenții necesare pentru ca teoriile să funcționeze, dar, după cum vom vedea imediat, recent a apărut prima dovadă experimentală privind existența a cel puțin unuia dintre aceste câmpuri. E important să înțelegem cât mai bine natura acestor câmpuri și particulele asociate lor, deoarece câmpul Higgs, care a declanșat tranziția de fază de la sfârșitul Epocii Electro–slabe, e de asemenea răspunzător pentru originea masei în univers.

Mecanismul Higgs și „particula lui Dumnezeu"

La sfârșitul Epocii Electro–slabe, universul se răcește până la temperatura de 10^{15} K și apare un alt câmp Higgs, care are în vid o

valoare medie nenulă.[32] Din perspectiva noastră, acesta se va dovedi unul dintre cele mai importante evenimente din întreaga istorie a universului.

Forța nucleară slabă și cea electromagnetică s-au separat acum, însă câmpul Higgs face mai mult decât să distingă între ele. Particulele de masă nulă interacționează cu câmpul, iar rezultatul e extraordinara bogăție de cuarci, leptoni și bosoni purtători ai forțelor, pe care o cunoaștem astăzi. Ce anume se întâmplă când o particulă de masă nulă interacționează cu câmpul Higgs depinde de tipul de particulă. La multe dintre ele, interacțiunea le încetinește sau, altfel spus, câmpul se opune accelerării lor, așa încât nu pot ajunge din nou la viteza luminii. E ca și cum câmpul Higgs ar apăsa pe frână: accelerarea particulelor e contracarată într-o măsură care depinde de tăria interacției.

De la Galilei încoace ne-am obișnuit să privim rezistența unui obiect la accelerare ca pe rezultatul masei sale *inerțiale*, așa încât considerăm că masa e o proprietate primară sau intrinsecă a substanței materiale, și identificăm masa inerțială cu cantitatea de „materie" pe care un obiect o posedă. Cu cât are mai multă materie, cu atât e mai greu de accelerat. Dar mecanismul Higgs răstoarnă această perspectivă. *Măsura în care câmpul Higgs se opune accelerării unei particule de masă altminteri nulă este acum interpretată ca masa inerțială a particulei* Masa a devenit o proprietate secundară, ea e rezultatul unei interacțiuni, nu ceva intrinsec materiei.

Să vedem cum funcționează acest mecanism în cazul purtătorilor forței slabe și electromagnetismului. De fapt, aceasta a fost prima aplicare formală a mecanismului Higgs la o problemă din fizica particulelor, publicată de Steven Weinberg în 1967, iar apoi de teoreticianul pakistanez Abdus Salam în 1968, bazându-se pe cercetările sale anterioare împreună cu teoreticianul britanic John Ward. Se bănuia de mult că forța slabă și electromagnetismul sunt cumva înrudite și că diferența dintre tăriile celor două forțe trebuie să se datoreze faptului că, spre deosebire de fotonul de masă nulă, purtătorii forței slabe – particulele W și Z – sunt dintr-un anume motiv „grele". Problema era că versiunea teoriei cuantice de câmp disponibilă la acea vreme prezicea că ele trebuie să aibă masă nulă, la fel ca fotonul.

Mecanismul Higgs a dat soluția. Înainte de ruperea simetriei, forța electro–slabă e purtată de patru particule de masă nulă, pe care le vom numi W+, W°, W^- și B°. Interacțiunile cu câmpul Higgs electro–slab fac ca particulele W+ și W– să dobândească masă. Particulele W° și B° ale forței electro–slabe se combină pentru a forma o particulă Z° masivă și fotonul de masă nulă. Asociem particulele masive W^+, W^- și Z° cu forța slabă, iar fotonul de masă nulă cu electromagnetismul. Această interacțiune cu câmpul de fond Higgs e cea care provoacă separarea forțelor.

În 1967, Weinberg a estimat că particulele W au fiecare o masă de aproximativ 85 ori mai mare decât protonul, iar Z° de 96 de ori. Particulele W au fost descoperite la CERN (Geneva) în 1982–1983, cu mase de 85 ori masa protonului, așa cum prezisese Weinberg. Descoperirea lui Z° a fost anunțată în 1983, masa lui fiind de aproximativ 101 ori masa protonului.

Vă reamintesc că fiecare câmp cuantic are asociată o particulă de câmp. În 1964 Higgs prezisese existența a ceea ce avea să fie numit „bosonul Higgs", particula elementară a câmpului Higgs. În articolul său din 1967, Weinberg demonstrase necesitatea introducerii unui câmp Higgs cu patru componente. Trei dintre ele dau masă particulelor W^+, W° și Z°. A patra apare ca o particulă fizică – un boson Higgs cu spinul zero. Ne putem la fel de bine închipui că cele patru componente ale câmpului reprezintă patru bosoni Higgs. Particulele W^+, W^- și Z° dobândesc masă „absorbind" trei dintre acestea și lăsând în urmă unul.

Pe 4 iulie 2012, oamenii de știință de la Marele Accelerator de Hadroni (Large Hadron Collider – LHC) de la CERN au anunțat că descoperiseră o nouă particulă „cu caracteristicile" bosonului Higgs. S-a găsit că aceasta are o masă de 133 de ori mai mare decât protonul și interacționează cu alte particule ale modelului standard exact cum se aștepta din partea bosonului Higgs. Analiza datelor colectate în 2011 și 2012 a fost evaluată într-un comunicat de presă din 14 martie 2013, care conchidea: „[...] avem de-a face cu un boson Higgs, dar va mai dura până să aflăm ce tip de boson Higgs este."[33]

În cartea sa *Particula lui Dumnezeu. Dacă universul e răspunsul, care–i întrebarea*?, publicată în 1993 și scrisă împreună cu Dick Teresi, fizicianul american Léon Lederman explica de ce a ales acest titlu:[34]

Bosonul e atât de important pentru fizica actuală, pentru înțelegerea ultimă a structurii materiei, dar și atât de insesizabil, încât l-am botezat particula lui Dumnezeu. De ce particula lui Dumnezeu? Din două motive. În primul rând, editura nu ne–ar fi lăsat să-i spunem particula blestemată, deși ar fi fost un titlu mai potrivit ținând cont de natura ei ticăloasă și cheltuielile pe care le provoacă. În al doilea rând, există o anumită legătură cu o altă carte, mult mai veche [...].

Lederman continua citând un pasaj din Geneză.

Denumirea „particula lui Dumnezeu" s-a impus. Mulți fizicieni au fost nemulțumiți de ea, în bună măsură fiindcă supraestimează importanța bosonului Higgs. Desigur, bosonul Higgs suscită un mare interes, dar *câmpul* Higgs e cel care fascinează. Câmpurile cuantice scalare au fost introduse în teoria cuantică de câmp pentru a rupe simetria și a crea masă. Ca să „vedem" bosonul Higgs a fost nevoie să fie construit un accelerator de particule care să ajungă la energiile la care poate fi perturbat câmpul Higgs, energii existente la sfârșitul Epocii Electro–slabe, la doar o bilionime de secundă după big bang. Avem acum dovada că cel puțin un tip de câmp Higgs există. Premiul Nobel pentru Fizică în 2013 le-a fost acordat lui Higgs și Englert ca recunoaștere a realizării lor din urmă cu 49 de ani.[35]

Modelul standard al particulelor elementare

E acceptat acum faptul că particula descoperită la CERN în 2012 este într-adevăr particula de câmp caracteristică a câmpului Higgs electro–slab, completând structura teoretică numită modelul standard al fizicii particulelor. Am vorbit deja despre particulele și forțele pe care le descrie modelul standard, dar cum ele reprezintă elementele de bază pentru tot ce urmează, merită să le privim mai îndeaproape. Modelul standard al particulelor și forțelor e rezumat în figura 2. Cuarcii și leptonii formează trei „generații", diferențiate prin masele particulelor. După cum am văzut, asta înseamnă că ele se diferențiază prin măsura în care particulele din fiecare generație interacționează cu câmpul Higgs.

Leptonii din prima generație sunt electronul (e) și neutrinul electronic (ν_e). Electronul este, desigur, binecunoscut, are sarcina electrică negativă –1 și o masă reprezentând aproximativ 0,00054 din masa protonului.[36] Neutrinul electronic vă e probabil mai puțin cunoscut. Denumirea de neutrin vine din italiană și înseamnă „neutru mic". Este o particulă neutră apărând în radioactivitatea beta: un neutron dintr-un nucleu atomic instabil se dezintegrează într-un proton, care rămâne în nucleu, și un electron și un neutrin, care sunt ejectați cu viteză mare. Pentru un timp s-a crezut că neutrinii sunt particule de masă nulă, dar acum se consideră că au o masă atât de mică încât e greu să fie măsurată cu precizie, ceea ce obținem fiind doar limitele ei superioare.

Leptonii din a doua generație sunt miuonul (μ^-) și neutrinul miuonic (ν_μ). Miuonul are sarcina electrică –1 și masa aproximativ 0,113 din masa protonului – este varianta mai grea a electronului. Particula tău (τ^-) din a treia generație e încă și mai grea, are o masă de 1,89 ori mai mare decât masa protonului. E acompaniat de neutrinul taonic (ν_τ).

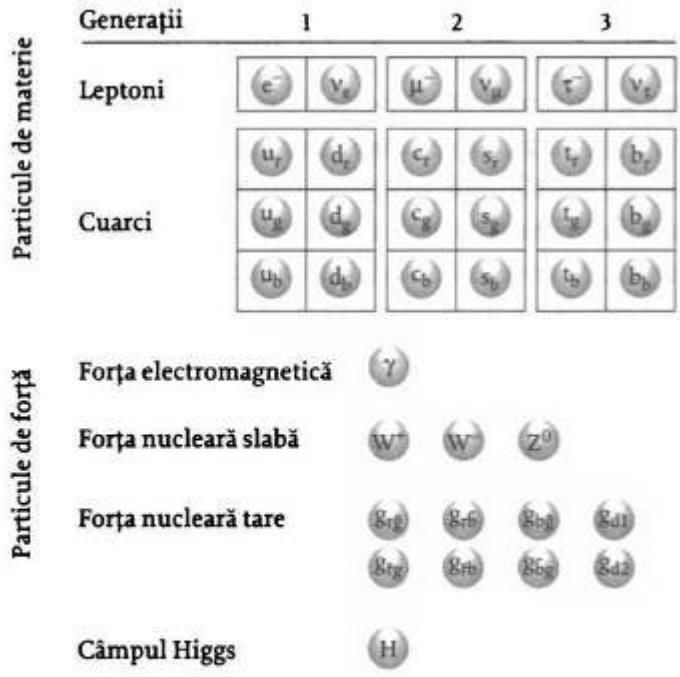


Figura 11. *Modelul standard al particulelor descrie interacțiunile a trei generații de particule de materie prin intermediul a trei tipuri de forțe, mediate de un ansamblu de „purtători de forță". Masele particulelor de materie și ale celor de forță sunt determinate de interacțiunile lor cu câmpul Higgs.*

Lucrurile nu se opresc aici. În august 1932, fizicianul american Carl Anderson a descoperit o particulă care semăna întru totul cu electronul, dar avea sarcină electrică pozitivă.[37] A numit–o *pozitron*, iar aceasta a reprezentat prima descoperire a particulelor de *antimaterie*, particule cu aceleaşi masă şi spin, dar sarcină electrică opusă. Toate particulele din modelul standard au omologi antiparticulă, care însă, pentru simplitate, nu apar în figura 2.[38]

Şi cuarcii formează trei generaţii. Prima generaţie e compusă din cuarcul up (u) cu sarcina electrică +2/3 şi cuarcul down (d) cu sarcina –1/3. Ideea de sarcină electrică fracţionară vi se pare pesemne bizară, şi într-adevăr n-a fost niciodată observat direct un cuarc cu sarcină fracţionară, dar vă asigur că există dovezi experimentale solide (deşi indirecte) pentru a crede că într-adevăr cuarcii există şi au proprietăţile pe care le bănuim. „Up" şi „down" reprezintă diferitele „arome" ale cuarcilor, iar fiecare aromă prezintă trei „culori": red [roşu], green [verde] şi blue [albastru] (indexaţi prin r, g şi b). Cuarcii up şi down sunt destul de uşori, dar mai grei decât electronul, având o masă raportată la cea a protonului de 0,0018 până la 0,0033(u) şi de 0,0044 până la 0,0061(d). Sunt date doar intervale pentru masa lor fiindcă deocamdată experimentele din fizica particulelor nu ne permit să deducem valori mai precise.

Protonii şi neutronii vă sunt cu siguranţă mai bine cunoscuţi decât cuarcii. Protonul e compus din doi cuarci up şi unul down (uud), cu o sarcină electrică totală de +1, iar neutronul dintr-un cuarc up şi doi cuarci down (udd), având sarcina o. S-ar putea să vă mire faptul că suma maselor a doi cuarci up şi a unuia down este mai mică decât masa protonului. Pare să „lipsească" o cantitate mare de masă (din datele de mai sus putem estima că masa combinaţiei uud e cuprinsă între 0,008 şi 0,013 din masa protonului, adică aproximativ 99% din proton a dispărut). Nu disperaţi – veţi afla curând răspunsul.

Acelaşi tipar se repetă la a doua şi a treia generaţie de cuarci. Cuarcul charm [farmec] (c) are sarcina +2/3 şi masa de 1,37 ori mai mare decât cea a protonului, iar cuarcul strange [straniu] (s) are sarcina –1/3 şi masa de 0,11 din masa protonului. În mod asemănător, cuarcul top [vârf] are sarcina +2/3 şi masa de 184 ori mai mare decât cea a

protonului, iar cuarcul bottom [bază] (b) are sarcina –1/3 şi masa de 4,47 ori mai mare decât cea a protonului. Toţi cuarcii şi leptonii au spinul 1/2 (sunt fermioni) şi toţi au omologi antiparticule.

Forţa electromagnetică acţionează asupra tuturor particulelor încărcate electric şi e transportată de fotonul de masă nulă (y). Forţa nucleară slabă acţionează atât asupra cuarcilor, cât şi asupra leptonilor, şi, după cum am arătat, e transportată de „fotonii grei", particulele W^+, W^- şi Z^o.[39] În radioactivitatea beta, un cuarc down din neutronul unui nucleu instabil se transformă într-un cuarc up, iar neutronul devine proton. Cuarcul down emite o particulă W–, aşa încât sarcina electrică se echilibrează. Particula W– se dezintegrează imediat într-un electron şi un antineutrin electronic.

Forţa nucleară tare acţionează doar asupra cuarcilor, fiindcă ei sunt singurele particule care posedă „sarcină de culoare". Forţa tare este cea care ţine cuarcii laolaltă în interiorul protonilor şi neutronilor, dar natura ei nu e uşor de intuit. Când ne imaginăm o forţă care acţionează între două particule, avem în vedere de regulă gravitaţia şi electromagnetismul, la care forţa creşte când particulele se apropie (figura 12). Forţa tare nu se comportă însă aşa. E ca şi cum cuarcii ar fi prinşi de capetele unui elastic sau ale unui resort. Când cuarcii sunt apropiaţi, elasticul e destins şi între ei practic nu există o forţă, dar când încercăm să-i depărtăm întindem elasticul. Forţa creşte cu cât tragem mai tare.

Acest lucru e ilustrat în figura 12 (b) prin interacţiunea dintre un cuarc şi un anticuarc. Asemenea particule cuarc–anticuarc se numesc *mezoni.* De exemplu, particula compusă dintr-un cuarc up (sarcină +2/3) şi un anticuarc down (+1/3) este un mezon numit pion pozitiv (π^+) cu sarcina +1.

Forţa tare e purtată de opt gluoni de masă nulă care transmit sarcina de culoare de la un cuarc la altul, ţinându–i astfel laolaltă.

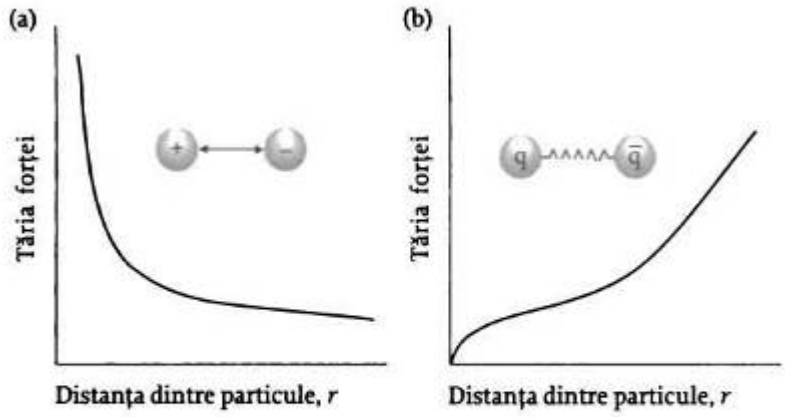


Figura 12. *(a) Forța electromagnetică dintre două particule încărcate electric crește pe măsură ce acestea se apropie. Dar forța de culoare care leagă doi cuarci se comportă diferit. (b) La limita distanței zero dintre un cuarc și un anticuarc (spre exemplu) forța e zero, iar aceasta crește când cuarcii se îndepărtează unul de altul.*

Iată răspunsul la misterul masei protonului. În principiu, energia unui cuarc singur, izolat e infinită – de aceea n-au fost niciodată observați cuarci individuali. În interiorul protonului sarcina de culoare a fiecărui cuarc e mascată prin combinarea ei cu a celorlalți doi cuarci de culori diferite, așa încât sarcina de culoare netă e zero. De pildă, un cuarc up roșu, un cuarc up verde și un cuarc down albastru se combină pentru a da un proton „alb" sau „fără culoare".

Totuși, în interiorul protonului nu sunt complet mascate sarcinile de culoare, fiindcă asta ar însemna ca toți cuarcii să fie așezați unul peste altul și să ocupe același loc în spațiu și timp. Însă cuarcii sunt fermioni, iar spinii lor semiîntregi îi împiedică să se „condenseze" astfel. Natura face aici un compromis. În interiorul unui proton sarcinile de culoare sunt expuse, iar energia – manifestată în gluonii asociați care trec de la unul la altul – crește. Creșterea este finită, dar importantă. Energia gluonilor din proton se însumează și, cu toate că ei au masă nulă, prin relația $m=E/c^2$, energia lor reprezintă 99% din masa protonului. Toți purtătorii de forță – fotonul, particulele W, Z și gluonii – au spinul 1 (sunt bosoni). Ultima particulă din modelul standard este, desigur, bosonul Higgs electro–slab cu spinul zero.

Modelul standard al particulelor elementare este un mare triumf al intelectului uman, dar în același timp e nesatisfăcător. El conține 61 de particule elementare. Să le numărăm: sunt trei generații de particule, fiecare formată din doi leptoni și două arome de cuarci, fiecare cu trei

culori diferite (însumând 24 de particule), plus antiparticulele lor (48), plus 12 particule purtătoare de forță (fotonul și particulele W^+, W^- și Z°, și opt gluoni), plus, în fine, un boson Higgs (în total 61). Deși avem motive întemeiate să credem că fiecare particulă cu masă și–o dobândește interacționând cu câmpul Higgs, nu știm ce determină tăriile acestor interacțiuni. Nu putem deci prezice masele particulelor, iar valorile lor nu par să se supună vreunei logici.

Materia întunecată

Pentru a explica structura universului la scară mare așa cum ne apare azi, avem nevoie de încă cel puțin un tip de particulă, care nu e inclusă în modelul standard. Am rugămintea să amânați întrebările care vă vin în minte pentru capitolul 4. Tot ce vreau să spun acum este că studiile privind mișcările galaxiilor și rolurilor de galaxii ne–au dus la concluzia că trebuie să existe un alt tip de materie, care e invizibilă și deocamdată nedetectabilă. Din lipsă de imaginație, ea poartă numele de „materie întunecată" și reprezintă peste 80% din întreaga materie (vizibilă și invizibilă) din universul actual, ceea ce, sincer să fiu, e cam stânjenitor.

Se crede că o mică parte din materia întunecată există sub forma unor obiecte astronomice exotice compuse din materie obișnuită, care emit foarte puțină radiație sau nu emit deloc (de aceea ne apar „întunecate"). Acestea se numesc „obiecte astrofizice masive compacte nebuloase" *(Massive Astrophysical Compact Halo Objects* sau MACHO). Marea majoritate a materiei întunecate se crede însă că e alcătuită din particule necunoscute, numite „particule masive care interacționează slab" (*Weakly Interacting Massive Particles* sau WIMP).[40] Aceste particule au multe dintre proprietățile neutrinilor, dar trebuie să fie mult mai masive, deci se mișcă mult mai lent prin spațiu–timp.

Epoca cuarcilor: de la 10^{-12} la 10^{-6} secunde

Avem acum toate componentele elementare ale universului vizibil (și invizibil). Însuși spațiul–timp e umplut cu energia vidului, numită energie întunecată, care se va face simțită peste aproximativ nouă miliarde de ani. Cele patru forțe ale naturii au luat formele pe care vom ajunge noi să le cunoaștem. Universul conține în mare măsură particule de materie întunecată, care se supun gravitației și forței slabe –

deocamdată nu știm mai mult despre ele. Să ne concentrăm deci asupra materiei vizibile – cuarcii, leptonii și particulele de forță ale modelului standard.

La sfârșitul Epocii Electro–slabe temperatura e încă foarte ridicată, 10^{15} K. Deși energia unei sarcini de culoare izolate este teoretic infinită, în univers există încă prea multă energie pentru a avea cuarcii și anticuarci legați confortabil în mezoni și în particule mai mari precum protonii și neutronii, care se numesc *barioni.* De fapt, mezonii (de la grecescul *mesos*, însemnând „mijlociu") și barionii (de la grecescul *barys*, însemnând „greu") sunt subcategoriile unei clase de particule numite *hadroni* (de la grecescul *hadros*, care înseamnă „gros" sau „greu").[41]

Conținutul universului e dominat de o plasmă de cuarci, gluoni, leptoni, neutrini și fotoni. Există suficientă energie pentru a se forma toate cele trei generații de leptoni, cuarci și antiparticulele lor, iar gluonii se gonesc nebunește între cuarci în încercarea de a ecrana sarcinile de culoare expuse. Dacă se formează particule mari, ele se dezintegrează imediat. Aceasta e Epoca Cuarcilor.

Nu se știu prea multe despre plasma cuarc–gluon, dar în experimente recente de la Marele Accelerator de Hadroni (CERN) se încearcă crearea unei asemenea plasme pentru a i se studia proprietățile. Deși la CERN eforturile au fost concentrate asupra găsirii bosonului Higgs prin ciocnirile dintre protoni, acceleratorul a fost folosit și pentru a ciocni nuclee de plumb. De ce nuclee de plumb? Există patru izotopi[42] naturali ai plumbului (simbolul Pb). Unul dintre ei (^{206}Pb) conține 82 de protoni și 124 neutroni. Prin ciocnirea a două nuclee de plumb la energii similare celor din timpul Epocii Cuarcilor se obțin o mulțime de efecte. Pentru asemenea studii e folosit detectorul ALICE de la CERN.[43] Protonii și neutronii din nucleele de plumb se „topesc" în timpul ciocnirilor, eliberând cuarcii și gluonii din interiorul lor și recreând astfel plasma cuarc–gluon la temperaturi de aproximativ $5{,}5\times10^{12}$ K. Aceasta se răcește rapid, apărând o „furtună" de particule exotice și „jeturi" de cuarci și gluoni care se condensează pentru a forma mezoni și alte particule. Din aceste studii efectuate la CERN și în alte locuri a

reieșit că plasma cuarc–gluon se comportă mai curând ca un *lichid* foarte fierbinte și cu vâscozitate redusă, decât ca un gaz.

Universul continuă să se extindă și să se răcească, iar la o microsecundă (10^{-6} secunde) după big bang temperatura lui scade până la aproximativ 3×10^{12} K, suficient pentru a „confina" cuarcii în mezoni și barioni. Odată capturați înăuntrul acestor particule mai mari, nu mai există suficientă energie pentru a–i separa.

Epoca hadronilor: de la 10^{-6} secunde la 1 secundă

Materia universului e acum dominată de hadroni și antiparticulele lor. Printre aceste particule de materie se mai află bine cunoscuții protoni și neutroni și mai puțin cunoscuții pioni (un cuarc up și un anticuarc down), π (un cuarc down și un anticuarc up) și $\pi 0$ (un amestec de up–anti–up și down-anti–down). Cuarcii mai exotici din a doua și a treia generație au dispărut fie prin dezintegrarea în particule mai stabile, fie prin reacții de „anihilare" – ciocnirea dintre particulele de materie și de antimaterie.

În acest amestec se mai află și electroni, miuoni, neutrinii asociați, antiparticulele lor și fotoni. Particulele tău din a treia generație au fost anihilate. Neutrinii sunt particule foarte ușoare care se deplasează aproape cu viteza luminii. Odată ce încetează să interacționeze cu alte particule, ei se „decuplează", ignorând cea mai mare parte din restul materiei și antimateriei, și pur și simplu se extind împreună cu spațiul–timp însuși.

Nu există acum nicio sarcină de culoare expusă – cuarcii și gluonii sunt ascunși în interiorul hadronilor. Forța tare a devenit într-un fel „internalizată" și se manifestă doar înăuntrul particulelor mari. Forțele din plasma rezultantă de particule încărcate electric sunt forța slabă și electromagnetismul (predominant). Temperatura continuă să scadă, iar când ajunge pe la 10^{12} K hadronii și antihadronii se anihilează reciproc. Particule π^+ și π^- se anihilează, iar π° se dezintegrează în fotoni. Protonii anihilează antineutronii, iar antiprotonii anihilează neutronii. Au loc o mulțime de anihilări. De fapt, asemenea reacții de anihilare materie–antimaterie aveau loc de mult, însă la temperaturi înalte fotonii produși au suficientă energie pentru a recrea spontan perechi de

materie–antimaterie, așa încât nu există o pierdere netă. Acum însă, când temperatura scade, procesul se desfășoară într-un singur sens.

Logica elementară ne sugerează că materia şi antimateria ar trebui să dispară în cantităţi egale, transformându-se în cele din urmă în lumină, dar universul pe care îl observăm pare să conţină doar materie. Nu–i exclus ca bucăţi mari de antimaterie să existe în spaţiu – poate în roiuri de galaxii de antimaterie aflate la mare distanţă. Este practic imposibil să deosebim stelele din materie de stelele din antimaterie din asemenea galaxii pe baza măsurătorilor de pe Pământ sau din sateliți. Nu știm cum stau de fapt lucrurile, însă ideea că ar exista bucăţi mari de antimaterie în univers pare oarecum nefirească. Nu ne rămâne decât să acceptăm că, după ce s-au încheiat toate reacţiile de anihilare dintre hadroni, rămâne o cantitate mică de materie. La mijloc ar putea fi o pură șansă. Dacă există un mecanism fizic subtil pe baza căruia să se prevadă dominaţia materiei, acest mecanism rămâne deocamdată necunoscut.

Epoca leptonilor: de la 1 la 10 secunde

Marea majoritate a hadronilor şi antihadronilor au dispărut, iar materia din univers e acum dominată de leptoni. Pe măsură ce universul continuă să se extindă, iar temperatura scade până pe la 5×10^9 K, electronii şi pozitronii încep să se anihileze reciproc, iar neutrinii lor devin „decuplaţi”. Fotonii continuă să zboare înainte şi înapoi între particulele de materie, astfel încât rămân la temperatura plasmei fierbinţi, însă neutrinii stau deoparte, răcindu-se odată cu expansiunea generală a spaţiului–timp. Dispariţia perechilor electron–pozitron şi decuplarea neutrinilor fac ca reacţiile care transformă protonii în neutroni şi invers să înceteze. Numărul protonilor şi neutronilor din univers e acum „înghețat” la un raport de aproximativ cinci la unu. Reacţiile de anihilare continuă până când se împlinesc vreo zece secunde de la naşterea universului. Temperatura a scăzut până pe la 10^9 K şi nu mai există suficientă energie pentru crearea de perechi electron–pozitron. Din motive necunoscute, repet, materia triumfă asupra antimateriei, lăsând în urmă un mic reziduu de leptoni (în principal electroni), a căror sarcină negativă echilibrează sarcina pozitivă netă a hadronilor rămaşi.

Să recapitulăm. Universul are vârsta de zece secunde. Masa–energie a universului e dominată de energia întunecată, energia spațiului–timp „gol”. Misterioasele particule de materie întunecată constituie o altă parte importantă. Materia vizibilă are o contribuţie mică la totalul de masă–energie a universului: puțini hadroni reziduali (în principal protoni și neutroni în raportul de cinci la unu), leptoni (în principal electroni) și fotoni. Aceștia din urmă domină materia vizibilă și radiația din univers odată ce intrăm în Epoca Fotonilor.

3. Ultima suprafață de împrăștiere

Originea luminii

Universul nu va mai avea niciodată un conținut atât de simplu ca acum. Este dominat de lumină, fotonii fiind de circa 1,6 miliarde de ori mai numeroși decât barionii (protoni și neutroni). Dar dacă am putea arunca o privire în acel univers, n-am vedea mare lucru. Protonii și electronii zburdă liberi într-o plasmă densă, încărcată electric. Fotonii zboară înainte și înapoi între aceștia, iar interacţiile lor în special cu electronii liberi creează o „ceață” impenetrabilă în cea mai violentă furtună electrică. Bun venit în Epoca Fotonilor, care va dura de la secunda zece până la 380.000 de ani după big bang, și reprezintă subiectul acestui capitol. Fotonii fac legea, iar materia întunecată și neutrinii decuplați sunt martori pasivi la desfășurarea evenimentelor, dar noi ne vom îndrepta atenția către barioni. Deși copleșiți numericește și bombardați, ei sunt cărămizile primordiale ale materiei vizibile.

Nucleosinteza primară

La aproximativ o sută de secunde după big bang, temperatura universului a scăzut sub un miliard (10^9) de grade kelvin. Reacțiile guvernate de forța slabă, determinând raportul dintre numărul protonilor și cel al neutronilor, încetează, „înghețând” acest raport. Însă neutronul e intrinsec instabil. Unul din cei doi cuarci down ai săi e supus interacţiunii slabe care îl transformă în cuarc up, neutronul devenind astfel proton. Altfel spus, neutronii liberi sunt radioactivi.

Timpul de înjumătățire al neutronului liber este de aproximativ 610 secunde (puțin peste zece minute), ceea ce înseamnă că în acest interval ne putem aștepta ca jumătate din numărul inițial de neutroni să se fi dezintegrat în protoni (altfel spus, există o probabilitate de 50% ca fiecare neutron să se fi dezintegrat).[44] Universul e destul de tânăr, dar neutronii liberi existau încă de la începutul Epocii Hadronilor, la o milionime de secundă după big bang, așa încât în timpul scurs numărul lor a scăzut cu încă 25%. Astfel, raportul dinte protoni și neutroni crește la șapte la unu. Protonii și neutronii sunt numiți „nucleoni", deoarece compun nucleele atomice. La această temperatură, reacțiile nucleare dintre neutroni și protoni încep să producă acum combinații mai grele de nucleoni. Dacă înainte combinațiile dintre ei nu rezistau prea mult, acum rămân uniți suficient timp pentru a fi implicați în noi reacții. Acesta e începutul nucleosintezei primare.

Cele mai importante reacții nucleare simt ilustrate în figura 13. Protonul e reprezentat printr-o bilă roșie, iar neutronul, printr-o bilă albastră. Deoarece protonul este totodată și nucleul atomului de hidrogen, l-am notat cu ^{1}H, unde „H" reprezintă simbolul elementului chimic hidrogen, iar indicele superior 1 arată că acesta conține doar un nucleon – în cazul de față un proton. Deși nu e figurat în desen, rețineți că nucleul de hidrogen are o sarcină electrică pozitivă unitară ($^{1}H^{+}$).

Nucleosinteza începe cu reacția dintre un proton și un neutron. Protonul captează un neutron, transformându-se în ^{2}H. Este tot un nucleu de hidrogen, fiindcă identitatea sa chimică e dată de numărul de protoni, care e tot unu. Acest izotop „greu" al hidrogenului se numește deuteriu. Protonul și neutronul din deuteriu stau fără probleme unul

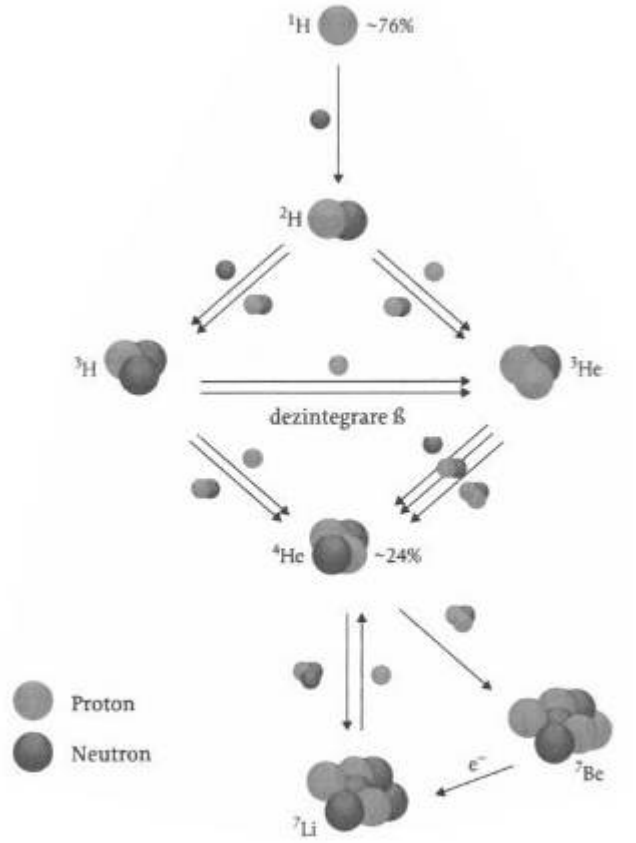


Figura 13. *Şaisprezece dintre cele mai importante reacţii nucleare implicate în nucleosinteza primară. Acestea sunt reprezentate schematic prin reacţiile protonilor (bilele roşii) cu neutronii (bilele albastre). Pentru simplitate, nu sunt prezentaţi toţi produşii de reacţie.*

lângă altul, iar energia combinaţiei e mai mică decât suma energiilor unui proton liber şi a unui neutron liber cu o cantitate numită energie de legătură. Acest surplus de energie e eliminat din nucleul 2H de un foton (nereprezentat în figura 13). Se pune însă o întrebare: ce forţă ţine împreună protonul şi neutronul în nucleul de deuteriu? Răspunsul standard era: forţa tare, desigur! Ştim însă acum că forţa tare (de culoare) ţine împreună cuarcii în *interiorul* protonului şi neutronului. Atunci ce se întâmplă?

Există cel puţin două moduri de a privi problema. Putem considera forţa care menţine uniţi protonul şi neutronul ca pe un fel de „scurgere" a forţei de culoare dincolo de graniţele fiecărui nucleon. Rezultatul nu e o forţă la fel de tare ca forţa de culoare, dar e suficient de tare pentru a menţine nucleonii împreună. Putem de asemenea considera că e vorba de o nouă forţă derivată sau secundară (nu e „fundamentală"),

acționând între protoni și neutroni și, după cum vom vedea, între protoni și protoni (învingând forța de repulsie electrostatică dintre sarcini de același semn) sau între neutroni și neutroni. Prin definiție, o asemenea forță derivată sau secundară trebuie să aibă particule purtătoare de forță asociate. Acestea sunt pionii π+, *π*– și π°. Dacă un proton (format din doi cuarci up și unul down, uud) și un neutron (udd) schimbă între ei pioni pozitivi și negativi (formați din cuarci down-anti–up și up–anti–down), atunci protonul se transformă în neutron, iar neutronul în proton. Nimic nu se modifică dacă privim din exterior, dar schimbul reduce energia combinației, legând astfel particulele între ele.

În partea de sus a figurii 13 observăm că nu e posibilă construirea unor nuclee mai grele fără a avea întâi nuclee de deuteriu. Asta înseamnă că viteza sau rata cu care se desfășoară această primă reacție va determina în mare măsură rata întregului lanț de reacții care urmează, ceea ce se numește *gâtuirea provocată de deuteriu.* Odată ce avem un număr suficient de nuclee de deutriu, ce se întâmplă în continuare va depinde pur și simplu de ratele relative ale reacțiilor nucleare care urmează.

Ajuns aici, nu pot să nu–mi aduc aminte de lecțiile de matematică din școală. Ca să învățăm calcul diferențial, ni se dădeau probleme care presupuneau rezolvarea unor ecuații diferențiale implicând procese desfășurate la viteze diferite – cum ar fi umplerea cu apă a unei căzi la care n-am pus dopul.[45] Apa de la robinet curge cu o viteză, iar apa din cadă se scurge cu altă viteză. Întrebarea era: în cât timp se umple cada?

Deși ceva mai complicată, rezolvarea ecuațiilor diferențiale pentru nucleosinteza primară e în principiu aceeași. Figura 13 prezintă șaisprezece reacții nucleare. E ca și cum, în problema de la școală, apa din cadă s-ar scurge în altă cadă, apoi, cu viteză diferită, în altă cadă etc., până ajunge în ultima cadă. Pentru a rezolva ecuațiile trebuie să măsurăm ratele tuturor reacțiilor nucleare implicate. Rezultatul depinde de ratele acestor reacții și de condițiile inițiale, cele de la începutul nucleosintezei, cum ar fi temperatura sau raporturile dintre fotoni și barioni și dintre protoni și neutroni. Putem obține toate aceste informații din studiul reacțiilor nucleare și din observații asupra universului actual (vom vorbi despre acestea în cele ce urmează). Cunoaștem și temperatura, care trebuie să fi fost suficient de scăzută ca

să permită formarea nucleelor de deuteriu în cantități îndestulătoare pentru a depăși gâtuirea provocată de deuteriu.

Să ne continuăm povestea. Un nucleu de deuteriu (^{2}H) poate reacționa mai departe, captând un neutron, pentru a forma un nucleu de tritiu (^{3}H) – un izotop și mai greu al hidrogenului – plus un foton (nereprezentat în figura 13), poate reacționa cu alt nucleu de deuteriu, pentru a forma tritiu plus un proton liber, sau poate reacționa cu un neutron sau cu alt nucleu de deuteriu pentru a forma 3He, un izotop instabil al heliului format din doi protoni și un neutron.

La fel ca neutronul liber, și nucleul de ^{3}H e supus forței slabe. Un neutron din nucleul de ^{3}H (un proton, doi neutroni) se poate transforma în proton, ajungându-se astfel la ^{3}He (doi protoni, un neutron), ceea ce în figura 13 apare ca „dezintegrare", fiindcă acesta e procesul implicat în radioactivitatea beta. Cred că ați înțeles mecanismul. Nucleele de ^{3}H și ^{3}He pot suferi diverse reacții pentru a forma nucleul de ^{4}He, cel mai răspândit izotop al heliului. Această combinație de doi protoni și doi neutroni e deosebit de stabilă. Deși poate suferi în continuare reacții (cu ^{3}He pentru a produce un izotop instabil al beriliului, ^{7}Be, sau cu ^{3}H pentru a produce un izotop al litiului, ^{7}Li), rata cu care se golește „cada" de ^{4}He e mult mai mică decât cea cu care se umple, așa încât nucleele de 4He se acumulează în cantități mari.

Nu toate reacțiile nucleare implicate în nucleosinteza primară au fost incluse în figura 13, dar cele mai importante sunt prezentate. Atunci de ce lanțul pare să se oprească la ^{7}Li? Știm că există în univers elemente mai grele, cum ar fi carbonul, oxigenul, azotul, fiindcă din ele suntem alcătuiți. Răspunsul este că numai anumite combinații de protoni și neutroni au o stabilitate de durată, determinată de proprietățile cuarcilor constituenți. Următorul element din tabelul periodic e beriliul, dar ^{7}Be și ^{8}Be sunt instabili (cel mai răspândit izotop al beriliului este ^{9}Be, format din patru protoni și cinci neutroni). Acest gol nu e o prăpastie de nedepășit în condițiile din primele sute de secunde după big bang. Vom vedea în capitolul următor cum se trece peste prăpastie

în interiorul stelelor, acolo unde sunt sintetizate majoritatea elementelor mai grele decât heliul.

Aşadar ce obţinem? Date fiind condiţiile iniţiale şi ratele măsurate ale tuturor reacţiilor nucleare implicate, ecuaţiile diferenţiale pot fi rezolvate numeric (pe calculator) pentru a obține rezultatul final. Deşi ^{2}H e un intermediar esenţial în acest lanţ de reacţii, el e consumat aproape la fel de rapid pe cât e produs, aşa încât numărul nucleelor de ^{2}H rămase e foarte mic (raportul dintre nucleele de deuteriu şi cele de hidrogen este de aproximativ 0,00003). Cam la fel stau lucrurile şi cu ^{3}He (raportul dintre nucleele de ^{3}He şi cele de hidrogen se estimează a fi mai mic decât 0,00007). Fiind atât de stabile, nucleele de ^{4}He se acumulează, iar la sfârşitul nucleosintezei reprezintă 24% din totalul masei. Numărul nucleelor de ^{7}Li rămase e foarte mic (raportul dintre nucleele de ^{7}Li şi cele de hidrogen este de aproximativ $5x10^{-10}$), ceea ce înseamnă că restul de 76% din masă e dată de nucleele de (protoni) care n-au reacţionat.

Toţi neutronii din univers au fost încorporaţi în nucleele de 4He, ceea ce împiedică pierderi ulterioare prin procese radioactive.

Numărul nucleelor de 4He rezultate este deci precis determinat de numărul neutronilor disponibili la începutul nucleosintezei. Deoarece există doi protoni şi doi neutroni în fiecare nucleu de ^{4}He, atunci proporţia masei de ^{4}He trebuie să fie dublul proporţiei neutronilor din amestecul iniţial. Un raport iniţial protoni–neutroni de 7 la 1 implică un procentaj al neutronilor de aproximativ 12%. De două ori 12% face 24%.[46]

Nucleosinteza schimbă compoziţia plasmei încărcate electric de la una cu protoni, neutroni, electroni şi fotoni la una cu protoni de sarcină pozitivă (1H), nuclee de 4He încărcate pozitiv, electroni şi fotoni. Deşi nu au luat parte la aceste evenimente, să nu uităm de neutrinii decuplaţi şi de particulele de materie întunecată. Universul e în continuare o plasmă încărcată, bântuită de furtuni electrice.

Putem măsura cantităţile de hidrogen şi heliu din universul actual. Desigur, compoziţia s-a modificat în cei 13,8 miliarde de ani scurşi.

După cum vom vedea în capitolul următor, hidrogenul şi heliul sunt consumaţi în interiorul stelelor şi convertiţi în elemente mai grele. Stelele „gătesc" nucleele de hidrogen, producând în cea mai mare măsură heliu. Însă există nori de gaz interstelar cu o compoziţie asemănătoare celei din universul primordial, de la care putem deduce destul de exact rezultatele acestei nucleo–sinteze timpurii. Deducţiile confirmă amestecul de 76% hidrogen şi 24% heliu existent la câteva sute de secunde după big bang.

Alpher, Bethe, Gamow

Unul dintre primii fizicieni nucleariști care a luat în serios ideea că la originea universului se află big bang-ul a fost emigratul ucrainian George Gamow. În anii 1930, Lemaître emisese ipoteza că big bangul implicase dezintegrarea radioactivă a unui fel de „atom primar", conţinând toţi protonii şi neutronii din univers. Deşi atrăgător, modelul nu putea explica abundenţele relative ale hidrogenului, heliului şi ale celorlalţi atomi mult mai rari din univers. Un asemenea atom primordial ar fi într-adevăr instabil şi s-ar dezintegra rapid, însă dezintegrarea ar implica cel mai probabil reacţii nucleare de *fisiune,* în care nucleele s-ar sparge în fragmente mai mici, şi nu s-ar dezmembra complet pentru a forma protoni şi neutroni individuali. Lui Gamow i se părea mai logic să înceapă cu un univers alcătuit din neutroni primordiali (protonii formându-se din dezintegrările prin forţa slabă) şi electroni, iar aplicând principiile fizicii nucleare să deducă ce e probabil să se fi petrecut mai departe. Ajutat de tânărul fizician american Ralph Alpher, exact asta a făcut. Deşi punctul lor de pornire era greşit (cuarcii nu fuseseră descoperiţi, iar noi ştim acum că protonii şi neutronii s-au format în cantităţi aproape egale în Epoca Hadronilor), Alpher şi Gamow au prezis cu succes abundenţa relativă a hidrogenului şi heliului care a rezultat din nucleosinteza primară.

Când a trimis articolul care prezenta calculele lor unei prestigioase reviste ştiinţifice, Gamow a adăugat la lista de autori numele altui fizician emigrat, Hans Bethe. Bethe nu avea vreo legătură cu această lucrare, dar Gamow, autor al cărţilor de popularizare a ştiinţei cu domnul Tompkins, avea faima de poznaş.[47] L-a încântat ideea de articol semnat „Alpher, Bethe şi Gamow". Articolul, care inevitabil avea să

devină cunoscut drept articolul alfa–beta–gama, a fost publicat pe 1 aprilie 1948. Gamow îl menţionase iniţial pe Bethe ca autor *in absentia*, dar editorul revistei a eliminat nota. Bethe, căruia i s-a cerut să revizuiască manuscrisul, nu s-a supărat. „Mi se părea o glumă bună, iar articolul era pesemne corect, aşa că nu m–a deranjat că se adăugase numele meu.”[48] Alpher însă n-a savurat gluma. Articolul era rezumatul tezei lui de doctorat. Cum Gamow şi Bethe se bucurau de faimă internaţională, cine citea articolul putea bănui că ei făcuseră toată munca.

Recombinarea

Universul traversează acum o perioadă de calm relativ fără precedent. Un început scurt şi frenetic, cu forţe şi apoi particule elementare care apar din explozia iniţială a spaţiului, timpului şi energiei deschide acum calea unei perioade de 380.000 de ani fără mari schimbări în compoziţia globală. Desigur, universul continuă să se extindă şi să se răcească, temperatura scăzând în cele din urmă până la aproximativ 3000 K. Aceasta declanşează ceea ce, din perspectiva noastră, se va dovedi a fi un alt moment foarte important în evoluţia universului. La această temperatură, nucleele libere de heliu (^{4}He) se combinaseră deja cu electronii liberi pentru a forma atomi neutri de heliu. Acum, la 3000 K, protonii liberi (^{1}H) se combină cu electronii liberi pentru a forma atomi neutri de hidrogen. Fotonii, care până în acest moment zburau între particulele încărcate electric alcătuind plasma şi interacţionau cu ele, sunt acum eliberaţi. Ei se decuplează de materie la fel cum se decuplaseră şi neutrinii cu mii de ani în urmă.

Subtitlul ales pentru acest capitol e puţin derutant. Fotonii au existat în univers aproape de la bun început, aşa că acest moment al recombinării[49] nu se poate spune că indică apariţia particulelor elementare de lumină. Dar fotonii eliberaţi acum din legăturile lor cu materia vor dăinui pentru totdeauna, iradiind liber în univers cam la fel cum iradiază spre noi lumina Soarelui. Chiar dacă aceasta nu e originea particulelor de lumină, ea e originea fenomenului luminii aşa cum îl percepem noi. Şi e cea mai veche lumină din univers.

Universul devine transparent, fiind inundat de lumina eliberată prin recombinare. O parte din această lumină e vizibilă, deşi, evident, nu e nimeni s–o vadă. Ea se întinde pe un spectru larg de frecvenţe sau lungimi de undă, cu un maximum în infraroşu. Universul e literalmente scăldat într-o strălucire caldă, o „strălucire remanentă" a creaţiei. Lumina încetează să mai joace vreun rol, ea se răceşte pur şi simplu pe măsură ce e purtată de expansiunea spaţiului–timp. În proprietăţile ei se află însă ascunse indicii privind condiţiile în care a apărut. La fel ca particulele de materie întunecată şi neutrinii, lumina rămâne martorul mut al unor vremuri mai turbulente de la începutul universului, dar, spre deosebire de cazul particulelor de materie întunecată şi al neutrinilor, vom ajunge într-o bună zi să-i ascultăm mărturia.

Radiația cosmică de fond

Alpher era nemulțumit de faptul că modelul nucleosintezei primare elaborat împreună cu Gamow nu prezicea formarea elementelor mai grele decât heliul. Între timp, Gamow studiase alte aspecte ale universului imediat după big bang. În vara anului 1948 i-a trimis lui Alpher manuscrisul unui articol despre densitățile de materie și radiație în momentul recombinării, articol înaintat recent spre publicare revistei britanice *Nature.* Pe timpul verii, Gamow lucra în laboratorul de cercetări pentru armament nuclear al Statelor Unite de la Los Alamos. Când Alpher și colegul său Robert Herman[50] și-au dat seama că Gamow greșise la calcule, l-au informat printr-o telegramă. Gamow și-a zis că e prea târziu pentru a–și retrage articolul, în schimb i-a rugat pe Alpher și Herman să trimită revistei o notă prin care greșeala să fie corectată. Alpher și Herman au profitat de ocazie pentru a duce lucrurile mai departe. Ei afirmau în scurta notă că radiația eliberată după recombinare ar persista până în prezent, constituind un fel de „fond" cosmic care pătrunde în tot universul și umple tot spațiul.

Era de așteptat ca ea să aibă caracteristicile așa–numitei radiații a „corpului negru".

Dacă încălzim un obiect oarecare la o temperatură înaltă, acesta va căpăta energie și va emite lumină. Spunem că obiectul e „încălzit la roșu" sau „încălzit la alb". Crescând temperatura obiectului, lumina emisă crește în intensitate și e deplasată spre frecvențe mai mari (lungimi de undă mai scurte). Pe măsură ce e încălzit, obiectul emite o lumină roșie, apoi galben–portocalie, apoi galben–deschis, apoi albă strălucitoare. Un „corp negru" e un obiect teoretic complet nereflectant (perfect negru) care absoarbe și emite radiație luminoasă fără a favoriza vreun domeniu al lungimilor de undă. Intensitatea radiației emise de un corp negru se leagă așadar direct de cantitatea de energie pe care o posedă când se află în echilibru termic cu mediul înconjurător. Studiul radiației corpului negru îl condusese în 1900 pe Planck la descoperirea a ceea ce Einstein avea să numească fotoni sau „cuante de lumină".

Dacă plasma formată din nuclee atomice, electroni și fotoni s-a menținut la echilibru termic până în momentul recombinării – după cum era de așteptat, susțineau Alpher și Herman –, atunci radiația emisă în acel moment trebuia să aibă distribuția lungimilor de undă caracteristică unui corp negru la temperatura de 3000 K (figura 14). Odată decuplată de materie, radiația cosmică de fond se va fi răcit odată cu expansiunea universului. Alpher și Herman au estimat că în prezent ar avea o temperatură medie de 5 grade peste zero absolut, adică 5K. Radiația unui corp negru la temperatura de 5K ar avea o distribuție a lungimilor de undă cu un maximum în regiunea de microunde și infraroșu.[51]

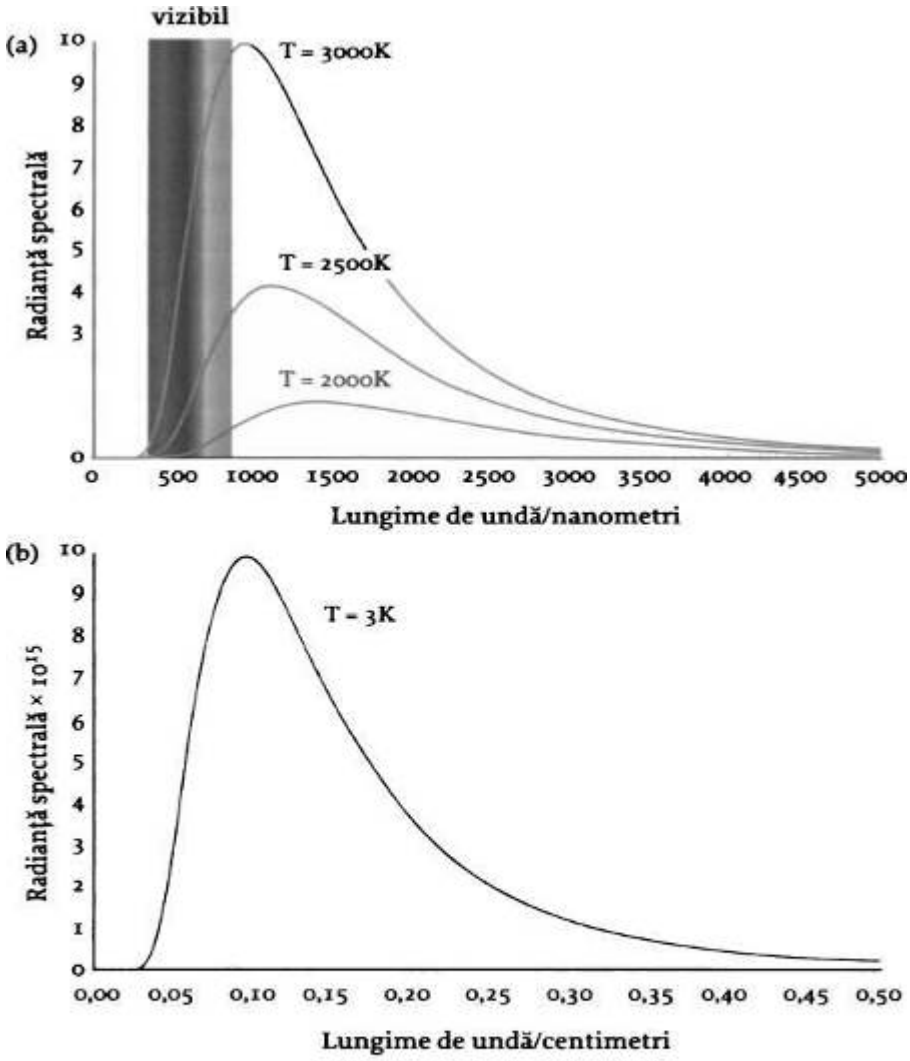


Figura 14. *Un „corp negru" perfect emite lumină cu o distribuție caracteristică a intensității, sau radianță spectrală, în funcție de lungimea de undă, pentru o anumită temperatură a corpului. (a) prezintă distribuția la temperaturile de 3000, 2500 și 2000 K. Observați că radianța spectrală scade abrupt și că distribuția se deplasează spre lungimi de undă mai mari atunci când temperatura scade. (b) prezintă aceeași distribuție pentru temperatura de 3 K, dar cu radianța spectrală mărită de 10^{15} ori în comparație cu (a), iar lungimile de undă sunt date în centimetri, nu în nanometri.*

Era o neașteptată predicție tranșantă, pe care numai o cosmologie bazată pe un big bang fierbinte putea s–o facă. Dovezile că universul nostru a început printr-o explozie ar trebui să se găsească pretutindeni sub forma unei radiații de microunde invizibile, dar detectabile. Predicția pare să fi fost însă ignorată. Cosmologia nu era încă o știință serioasă, se discuta aprins despre observații astronomice conform cărora universul era mai tânăr decât Pământul, apoi existau și teorii care nu presupuneau un big bang. Alpher și Herman s-au întrebat

ulterior dacă reputația ludică a lui Gamow n-a jucat cumva un rol. În celebra sa carte Primele trei minute, Steven Weinberg scria:[52]

Așa se întâmplă adesea în fizică – greșeala noastră nu e că ne luăm teoriile prea în serios, ci că nu le luăm destul de în serios.

Indiferent de motiv, deși tehnologia necesară detectării radiației cosmice de fond era disponibilă în anii 1950, nimeni nu s-a grăbit s–o caute sistematic.

Prin urmare, predicțiile lui Alpher și Herman erau practic uitate atunci când, în vara anului 1964, fizicianul Robert Dicke de la Universitatea Princeton spunea: „N-ar fi oare cazul ca cineva să caute această radiație?" Dicke redescoperise independent posibilitatea existenței radiației cosmice de fond și le-a cerut tinerilor radioastronomi Peter Roll și David Wilkinson să găsească un mijloc de a o detecta. Apoi i s-a adresat tânărului teoretician Jim Peebles din Manitoba: „N-ai vrea să te gândești la implicațiile teoretice?"[53] Peebles s-a întors acasă și s-a gândit. A reinventat o versiune a modelului big bang elaborat de Gamow, Alpher și Herman, pe baza căruia aceștia preziseseră o radiație cosmică de fond cu o temperatură de aproximativ 10 K. Însă când a trimis articolul spre publicare, editorul revistei l-a respins, susținând că Alpher, Herman și Gamow se ocupaseră de subiect cu ani în urmă. A fost o surpriză pentru Peebles.

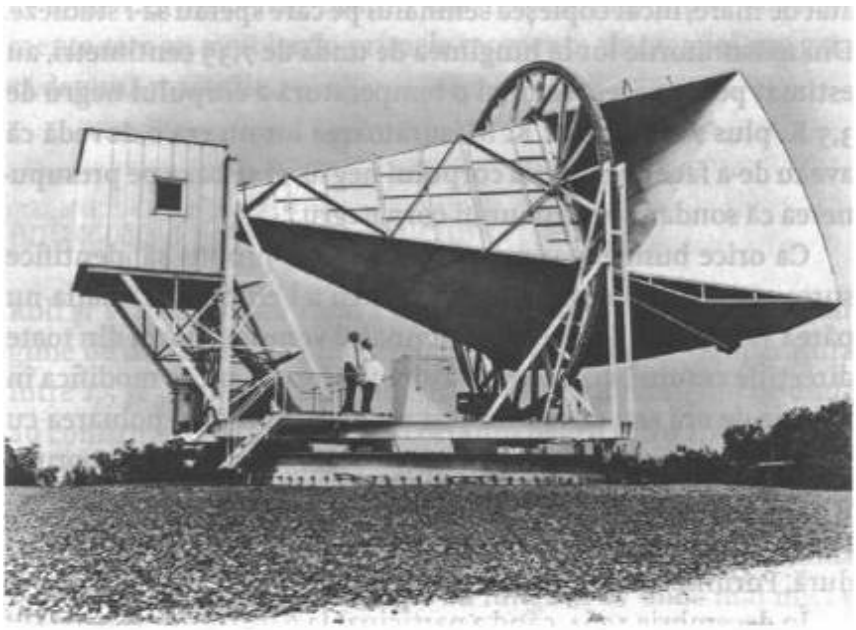


Figura 15. *Antena-cornet de 6 metri a Laboratoarelor Bell Telephone, devenită între timp piesă de patrimoniu.*

La mai puțin de 50 de kilometri distanță, la Laboratoarelor Bell Holmdel din New Jersey, radioastronomii Amo Penzias și Robert Wilson încercau să descopere sursa unor interferențe supărătoare din domeniul microundelor, care păreau să vină din toate direcțiile de pe cer și să fie imposibil de eliminat. Ei foloseau antena–cornet de 6 metri, construită pentru a demonstra posibilitatea comunicațiilor prin satelit (figura 15). Satelitul Telstar 1, lansat cu mult tapaj în iulie 1962, ieșise prematur din funcțiune în noiembrie, din cauza efectelor testării armelor nucleare în atmosferă. Satelitul a fost readus la viață în ianuarie 1963, dar tranzistorii lui au cedat definitiv o lună mai târziu, ceea ce a permis ca antena Holmdel să fie folosită în radioastronomie.

Penzias și Wilson căutau radiația de microunde care se credea că e emisă de norul de gaz incandescent din jurul Căii Lactee. Au început prin a orienta antena în direcții perpendiculare pe cele de unde se așteptau să provină radiația, pentru a stabili un „nivel de referință” în raport cu care să măsoare apoi semnalul. Spre surprinderea lor, au găsit un semnal puternic, un nivel de referință atât de mare, încât copleșea semnalul pe care sperau să-l studieze. Din măsurătorile lor la lungimea de undă de 7,35 centimetri, au estimat pentru acest semnal o temperatură a corpului negru de 3,5K, plus sau minus 1K.

Măsurătoarea lor nu era o dovadă că aveau de-a face cu radiația corpului negru, ci se baza pe presupunerea că sondau spectrul unui corp negru.[54]

Ca orice buni experimentatori, ei și-au propus să identifice sursa acestui „zgomot de fond", pentru a-l elimina. Radiația nu părea să depindă de direcție – semnalul venea uniform din toate direcțiile cerului, cu o temperatură uniformă, nu se modifica în funcție de oră sau de anotimp și nu se explica prin poluarea cu microundele din Manhattan. Ei au alungat și o pereche de porumbei care–și făcuseră cuib în antenă și au curățat mizeriile, dar cum porumbeii s-au întors, radioastronomii au recurs la o metodă mai dură. Porumbeii au murit degeaba, sursa de microunde persista.

În decembrie 1964, când a participat la o întrunire a Societății Americane de Astrofizică la Montreal, Penzias i-a pomenit unui coleg despre aceste observații ciudate și i s-a spus că Jim Peebles de la Princeton prezisese existența unei radiații cosmice de fond cu temperatura de 10 K. Penzias a făcut rost de o copie a manuscrisului încă nepublicat al lui Peebles. Intuind o posibilă legătură, l-a sunat pe Bob Dicke, îndrumătorul lui Peebles, tocmai când acesta se afla în biroul lui împreună cu Peebles, Wilkinson și Roll pentru a discuta proiectul antenei lor de microunde, care urma să fie instalată în Laboratorul Palmer de la Princeton. Dicke a ascultat atent și a mormăit câteva remarci, după care a pus receptorul în furcă. „Ei bine, băieți", a zis el, „ne–au luat–o alții înainte."[55] Dicke, Peebles, Wilkinson și Roll s-au urcat într-o mașină și au ajuns imediat la Holmdel. Penzias și Wilson, pe de o parte, iar pe de alta grupul de la Princeton au publicat simultan în mai 1965 articole complementare anunțând descoperirea radiației cosmice de fond. Cea mai veche lumină din univers, martora unor evenimente care au avut loc în primele momente ale creației, era gata să depună mărturie.

Anizotropia și originea structurii

Roll și Wilkinson au venit cu propriile lor măsurători, la o lungime de undă de 3,2 cm. Ei estimau că radiația are temperatura între 2,5 și 3K. Măsurători ulterioare la diferite lungimi de undă au confirmat o temperatură a corpului negru între 2,7 și 3K, dar toate acestea erau în

zona cu lungimi de undă mari a spectrului de corp negru din figura 14 (b). Motivul era că atmosfera Pământului e relativ transparentă pentru radiația cu lungimi de undă mai mari de 0,3 cm, dar radiația cu lungimi de undă mai mici e absorbită – de fapt, de la 0,1 cm în jos avem de-a face cu radiație infraroșie (căldură). Din păcate, aceasta e lungimea de undă la care radiația corpului negru cu temperatura de 3K e de așteptat să aibă maximumul.

Pentru a avea confirmarea că era într-adevăr vorba de radiația cosmică de fond, trebuiau efectuate măsurători dincolo de atmosferă. În 1977, pe când făcea ultimele corecturi la *Primele trei minute,* Weinberg a aflat de formarea unei echipe științifice pentru a studia posibilitatea cartografierii radiației cosmice de fond folosind instrumente de la bordul unui satelit care urma să se numească Exploratorul Fondului Cosmic (Cosmic Background Explorer – COBE). Între timp apăruseră câteva probleme delicate. În 1917, aplicând relativitatea generală întregului univers, Einstein a presupus că universul e uniform în toate direcțiile. Și într-adevăr, radiația cosmică de fond pare să aibă o temperatură uniformă în toate direcțiile – altfel spus e *izotropă.* Dar cum e posibil? Când universul se extinde până la momentul recombinării, distanțele dintre diferite părți ale lui cresc inevitabil. În cele din urmă, distanțele devin atât de mari, încât diferitele părți ale universului nu mai sunt în contact cauzal. Asta înseamnă că luminii îi ia prea mult timp să călătorească dintr-o parte în alta și, cum nimic nu călătorește mai repede decât lumina, aceste părți ale universului nu se pot mai influența fizic reciproc.

Iată un exemplu elementar. Dacă punem un obiect fierbinte în contact cu unul rece, știm că temperaturile lor se vor echilibra și vor deveni uniforme. Această uniformitate a temperaturii implică un schimb dinamic de energie, energia trecând de la obiectul fierbinte la cel rece, ceea ce se întâmplă pentru că ele se află în contact cauzal. Însă ultimul moment când radiația cosmică de fond putea fi influențată de un asemenea schimb dinamic de energie a fost la recombinare. După aceea, radiația a fost decuplată de materie și a interacționat foarte puțin cu ea. Problema era că universul în vârstă de 380.000 de ani devenise deja prea mare. Viteza finită a luminii nu mai permitea tuturor părților sale să rămână în contact.

Dacă diferite părţi ale universului se deconectaseră, după cum e de aşteptat, atunci nu există niciun motiv ca temperatura radiaţiei cosmice de fond să fie atât de izotropă. Aceasta se numeşte *problema orizontului.* Un posibil răspuns a fost dat în decembrie 1979, şi se leagă de inflaţia cosmică despre care am vorbit în capitolul 1. La începutul inflaţiei, fiecare parte a universului *era* în contact cauzal cu toate celelalte. Predomina echilibrul. La sfârşitul inflaţiei, acea uniformitate a fost imprimată universului care acum era mult, mult mai mare. Nu conta faptul că diferitele părţi ale universului nu mai erau în contact, deoarece fiecare parte se supunea aceloraşi condiţii post–inflaţie, iar din raţiuni fizice evidente, fiecare parte evolua în acelaşi fel. Unii teoreticieni susţin că inflaţia cosmică rezolvă atât problema netezimii spaţiului–timp *cât şi* pe cea a orizontului.[56]

Şi totuşi, ceva nu era în regulă. Dacă privim cerul noaptea, putem accepta că în linii mari universul arată cam la fel în toate direcţiile, după cum a presupus şi Einstein. Vedem stele, galaxii îndepărtate şi spaţiu gol. Un copil netulburat de autoritatea ştiinţifică a acestei observaţii va remarca însă că tiparul punctelor luminoase dintr-o parte e foarte diferit de cel din alta. Acordând atenţie detaliilor, trebuie să recunoaştem că universul are o *structură.* Şi, într-adevăr, studiile asupra tiparelor galaxiilor publicate spre sfârşitul anilor 1980 au arătat că pe firmament galaxiile sunt distribuite uniform, nu aleatoriu. Ele s-au format de-a lungul unor „şiruri" şi „ziduri", separate de mari „goluri". E un tipar haotic, şi totuşi un tipar. Vom vorbi mai mult despre această structură în capitolul următor.

Dacă acceptăm argumentul bazat pe inflaţia cosmică şi conchidem că radiaţia cosmică de fond e perfect izotropă, rezultă că şi distribuţia materiei la momentul recombinării trebuie să fi fost izotropă. Să ne închipuim un univers simplu bidimensional, cu o distribuţie uniformă (izotropă) de materie sub forma unor mici bile de biliard (figura 16 (a)). Cum bilele se află la distanţe egale între ele (şi presupunând că universul n-are margini), gravitaţia acţionează în mod egal asupra tuturor. Materia într-un asemenea univers e fixată. Chiar dacă spaţiul–timp se extinde, bilele se răspândesc, păstrând între ele distanţe egale. Nu se formează nicio structură.

Să deplasăm acum puțin una dintre bile, creând astfel o ușoară *anizotropie* (figura 16(b)). Bila deplasată resimte o atracție gravitațională puțin mai mare dinspre vecinul cel mai apropiat. Când aceste bile se apropie, ele exercită o atracție gravitațională mai mare asupra bilelor din jur. Procesul se desfășoară în avalanșă, iar în cele din urmă bilele se aglomerează într-o structură. Suntem nevoiți să conchidem că universul *trebuie* să fi fost anizotrop și, ca atare, temperatura radiației cosmice de fond trebuie să fie și ea anizotropă. Dar cât de mult? Pornind de la structura universului actual, întorcându–ne în timp și presupunând existența unei cantități suficiente de materie întunecată pentru a crea instabilități gravitaționale, s-a estimat că o anizotropie de câteva părți la 100.000 ar fi de ajuns. Natura întrebărilor s-a schimbat. Ce putea să fi provocat o anizotropie de câteva părți la 100.000 în distribuția materiei din univers? Și dacă această anizotropie e reală, o putem oare vedea reflectată în mici diferențe de temperatură a radiației cosmice de fond în diferitele direcții de pe cer?

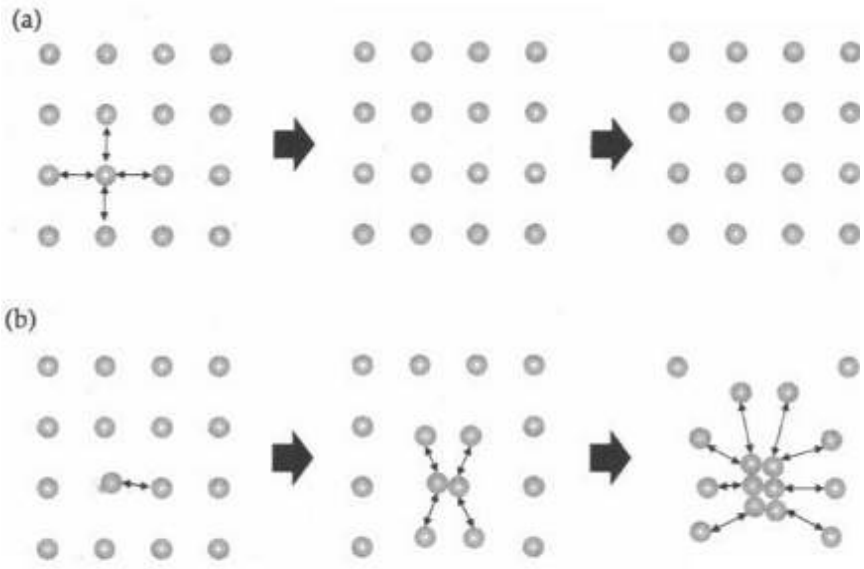


Figura 16. *(a) Într-o distribuție a materiei perfect uniformă sau izotropă, gravitația acționează egal în toate direcțiile, iar materia rămâne fixată, chiar dacă spațiul timpul se extinde. În (b) introducem o ușoară anizotropie depasând puțin o bilă. Bila deplasată resimte o atracție gravitațională puțin mai mare față de vecinul cel mai apropiat. În timp, materia se aglomerează, formând o structură.*

Principiul incertitudinii al lui Heisenberg

Pentru a răspunde la prima întrebare, trebuie să revenim la natura cuantică a particulelor elementare. Ce consecinţe are faptul că avem de-a face cu entităţi care sunt atât particule, cât *şi* unde? Să presupunem că am reuşi cumva să localizăm o particulă–undă cuantică într-o anumită regiune din spaţiu, aşa încât să-i măsurăm cu precizie poziţia. În descrierea ondulatorie, acest lucru e în principiu posibil combinând un număr mare de unde cu diferite lungimi de undă prin ceea ce se numeşte superpoziţie, aşa încât însumarea lor să dea o undă rezultantă cu o amplitudine mare într-un loc din spaţiu şi mică în rest. Asemenea „pachete de unde" (figura 17) sunt instabile, dar nu asta e problema. Vedem că prin superpoziţie putem măsura o poziţie instantanee.

Dar cum putem măsura o proprietate de tip corpuscular cum e impulsul? Aici avem o problemă, fiindcă am localizat unda combinând o mulţime de unde cu lungimi de undă diferite, adică există o dispersie a lungimilor de undă în superpoziţie. În 1923, de Broglie a înţeles că lungimea de undă a unei particule–undă cuantice e invers proporţională cu impulsul.[57] Dispersia lungimilor înseamnă deci dispersia impulsurilor particulei. Cu alte cuvinte, putem măsura cu precizie oricât de mare poziţia unei particule–undă cuantice, dar cu preţul incertitudinii asupra impulsului. Reciproca e de asemenea valabilă. Dacă avem o particulă–undă cuantică descrisă printr-o undă cu o singură lungime de undă, înseamnă că putem măsura impulsul cu precizie oricât de mare folosind relaţia lui de Broglie, dar nu putem localiza particula – rămâne răspândită în spaţiu. Putem măsura impulsul unei particule–undă cuantice cu precizie oricât de mare, dar cu preţul incertitudinii asupra poziţiei. Acesta e celebrul principiu al incertitudinii descoperit de Heisenberg în 1927.[58]

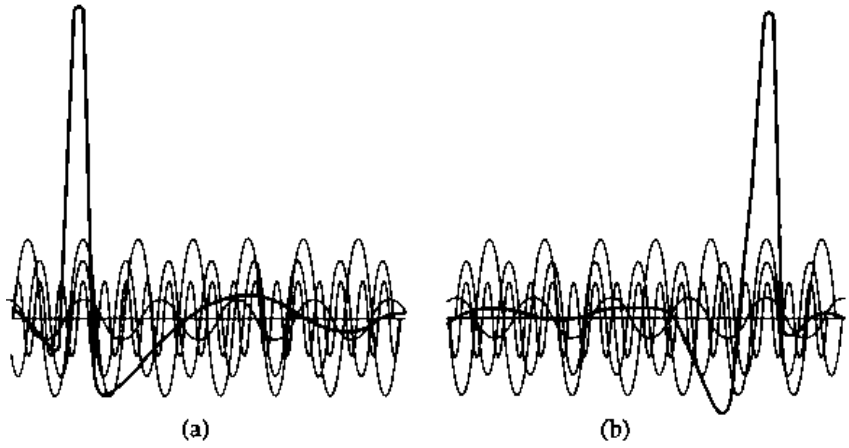


Figura 17. *Deși undele sunt prin definiție delocalizate, putem însuma multe unde cu frecvențe diferite pentru a crea o superpoziție care are un maximum pronunțat într-un anumit loc din spațiu, (a). Acesta e un „pachet de unde". Când ansamblul undelor se deplasează, maximumul se deplasează și el, dând impresia unei traiectorii de particulă prin spațiu, (b).*

Principiul incertitudinii nu se limitează la poziție și impuls, el se aplică și altor perechi de mărimi fizice, numite mărimi *conjugate*, cum ar fi energia și variația energiei în timp. Consecințele principiului sunt importante. Să presupunem că am crea un vid perfect, complet izolat de lumea exterioară. Am fi tentați să credem că nu există absolut „nimic" în acest vid, dar ce înseamnă asta? înseamnă că energia unui câmp electromagnetic (sau a oricărui alt câmp) în vid este zero. De asemenea, înseamnă că variația energiei acestui câmp e tot zero. Însă principiul incertitudinii ne interzice să cunoaștem cu precizie energia unui câmp electromagnetic și variația ei. Nu pot fi ambele exact zero.

Vidul e prin urmare instabil. Au loc fluctuații ale câmpului electromagnetic, a căror medie este zero, atât în ce privește energia, cât și variația ei, dar care pot fi totuși nenule în anumite puncte din spațiu și timp. După cum știm, fluctuațiile unui câmp cuantic sunt echivalente cu particulele cuantice. Aceste fluctuații în vid ale câmpului electromagnetic pot fi privite ca *fotoni virtuali:* „virtuali", în acest caz, nu pentru că nu ar fi „reali", ci pentru că nu sunt percepuți direct.

Pură fantezie? Deloc. Luați două plăci metalice și așezați-le în vid la o distanță de câteva milionimi de metru, izolate de orice fel de câmpuri electromagnetice exterioare. Între aceste plăci nu există nicio forță, cu excepția infimei atracții gravitaționale dintre ele, pe care o putem ignora. Și totuși, plăcile sunt împinse foarte ușor una spre alta. Ce se

întâmplă? Spațiul îngust dintre plăci limitează numărul fotonilor virtuali care pot exista acolo, iar densitatea fotonilor virtuali dintre plăci e mai mică decât densitatea fotonilor virtuali din zonele exterioare. Rezultatul este că plăcile resimt un fel de presiune a radiației virtuale, iar densitatea mai mare a fotonilor virtuali din zonele exterioare plăcilor le împinge una spre alta. Acesta e efectul Casimir, identificat pentru prima oară de fizicianul olandez Hendrik Casimir în 1948.

Iată deci răspunsul la întrebare. Fluctuațiile cuantice ale câmpului inflaționar care umplea universul la 10–35 secunde după nașterea lui s-au întipărit în structura la scară mare a universului prin inflația cosmică. Fluctuațiile cuantice sunt responsabile pentru o anizotropie de câteva părți la 100.000.

COBE, WMAP și Planck

Orizontul universului în momentul recombinării reprezintă o „ultimă suprafață de împrăștiere". Priviți această suprafață ca pe un fel de oglindă tridimensională. Imaginea reflectată în oglindă ne arată cum era universul la 380.000 de ani după big bang și poartă amprenta fluctuațiilor cuantice existente la 10^{-35} secunde după big bang, mărite la proporțiile universului prin inflația cosmică. Și pentru că lumina eliberată în momentul recombinării a rămas în mare măsură neafectată de evoluția ulterioară a universului (în afară de răcire și deplasarea în domeniul microundelor), imaginea persistă chiar dacă oglinda a dispărut demult.

Să trecem la a doua întrebare. Putem căuta această imagine? Putem vedea fluctuațiile în radiația cosmică de fond? Se cuvine să fim precauți. Există mai multe surse de anizotropie în radiația cosmică de fond, și trebuie să le deosebim. Există trei așa–numite anizotropii *primare.* Din perspectiva noastră, cea mai importantă dintre ele apare din fluctuațiile cuantice primordiale reflectate în mici diferențe în distribuția materiei (și ulterior a temperaturii radiației).

A doua rezultă din competiția dintre gravitație și presiunea radiației din plasma de tip fluid până la momentul recombinării. În timp ce gravitația încearcă să aducă laolaltă nucleele atomice din plasmă,

presiunea radiației încearcă să le îndepărteze, iar această competiție are ca rezultat așa–numitele oscilații acustice: unde sonore care se deplasează înainte și înapoi prin fluid.[59] Undele sonore produc regiuni cu densitate a materiei puțin mai mare (compresii) și regiuni cu densitate a materiei puțin mai mică (rarefieri), suprapuse pe fluctuațiile cuantice primordiale. Aceste diferențe de densitate a materiei se traduc prin mici diferențe ale temperaturii radiației.

A treia sursă de anizotropie primară rezultă din fluctuațiile gravitaționale, atât la momentul recombinării, cât și ulterior, care pot provoca mici deplasări ale frecvenței radiației. Undele gravitaționale primordiale produse în timpul inflației cosmice (mult mai slabe decât cele declanșate de fuziunea găurilor negre sau ciocnirea stelelor neutronice) se crede că provoacă o anizotropie în așa–numita polarizare de tip B a radiației cosmice de fond.[60]

Putem construi un model teoretic pentru a descrie toate aceste surse, dar el depinde critic de câțiva parametri, cum ar fi densitatea materiei barionice, a materiei întunecate și a energiei întunecate. Dacă modificăm fie și foarte puțin acești parametri, se modifică predicțiile pentru tiparele variațiilor primare de temperatură din radiația cosmică de fond.

De asemenea, e de așteptat să existe și câteva importante surse *secundare de* anizotropie a radiației. Prima se datorează pur și simplu faptului că galaxia noastră Calea Lactee se deplasează: mișcarea provoacă o mică „variație dipolară”: radiația de fond apare puțin mai caldă dacă ne mișcăm spre ea și puțin mai rece dacă ne îndepărtăm. Această variație trebuie măsurată și scăzută din datele de temperatură pentru a scoate la iveală fluctuațiile primare.

A doua sursă secundară se datorează împrăștierii fotonilor radiației cosmice de fond pe electronii din roiurile de galaxii din spațiul intergalactic de-a lungul direcției de observare. Acest efect modifică ușor nu doar temperatura, ci și forma spectrului de radiație a corpului negru. Din fericire, densitatea electronilor din spațiul intergalactic e destul de mică, iar anizotropia nu e pronunțată. Dependența ei caracteristică de frecvența fotonului o face să fie ușor de deosebit de anizotropia primară.

În 1977, o echipă de cercetători de la Universitatea Berkeley din California a detectat și cartografiat variația dipolară folosind instrumentele de la bordul avionului Lockheed U–2 zburând la peste 20.000 de metri altitudine.[61] O hartă mai recentă a variației dipolare pe întregul firmament e prezentată în figura 18. Din analiza imaginii se poate deduce că grupul local de galaxii din care face parte Calea Lactee se deplasează în direcția roiului de galaxii Fecioara cu o viteză de aproximativ 600 km/s. Echipa de la Berkeley n-a găsit însă vreo dovadă pentru anizotropia primară, și a devenit limpede că doar instrumentele de pe sateliți pot fi suficient de sensibile.

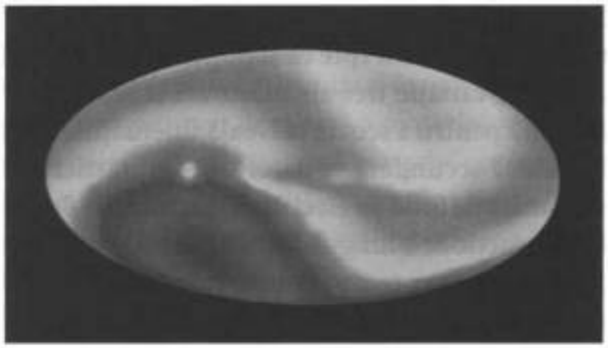


Figura 18. *Mișcarea Căii Lactee prin radiația cosmică de fond provoacă o ușoară deplasare a temperaturilor măsurate, radiația părând ceva mai caldă dacă ne mișcăm spre ea și ceva mai rece dacă ne îndepărtăm. Variația dipolară e reprezentată prin culori false în această hartă a temperaturilor firmamentului. Zonele mai calde (cu o temperatură cu 0,003 K mai mare decât media) apar colorate în roșu, iar cele mai reci (cu 0,003 K sub medie) în albastru. Planul Căii Lactee se află pe orizontala care trece prin centru.*

Satelitul COBE urma să fie lansat în 1988, dar după dezastrul navetei Challenger din 28 ianuarie 1986, navetele au rămas la sol. În cele din urmă, COBE a fost plasat pe o orbită sincronă cu Soarele pe 18 noiembrie 1989. Pe 13 ianuarie 1990, la o întrunire a Societății Americane de Astronomie de la Cristal City, Virginia, John Mather, membru al echipei COBE, a anunțat că misiunea decurge normal și că va mai dura un an până ce instrumentele de la bordul satelitului să încheie cartografierea radiației cosmice de fond pe întreg firmamentul. A prezentat totuși rezultate preliminarii pe baza a doar nouă minute de măsurători care confirmau că spectrul radiației cosmice infraroșii și de microunde e cel al unui corp negru la o temperatură de 2,736K, corectată în urma analizelor ulterioare la valoarea de 2,728K (figura 19).[62]

Echipa COBE şi-a încheiat misiunea la începutul lui 1992. Variaţia dipolară (figura 18) a fost măsurată şi scăzută din harta temperaturii pe întregul firmament. Rezultatul a fost anunţat pe 23 aprilie 1992. Harta temperaturii reziduale dezvăluia într-adevăr anizotropiile primare dominate de fluctuaţiile cuantice de la începutul universului (figura 20). Ştirea a apărut pe prima pagină din *New York Times.*

E greu să nu fii tulburat de această hartă. De-a lungul istoriei umane, dezbaterile privind originea şi evoluţia universului ţineau de religie sau de filosofie. Abia în ultimul secol au apărut explicaţii ştiinţifice plauzibile pentru structura universului. „Dacă sunteţi religioşi", a declarat George Smoot, responsabilul pentru analiza variaţiilor de temperatură din echipa COBE, „e ca şi cum aţi vedea chipul lui Dumnezeu".[63]

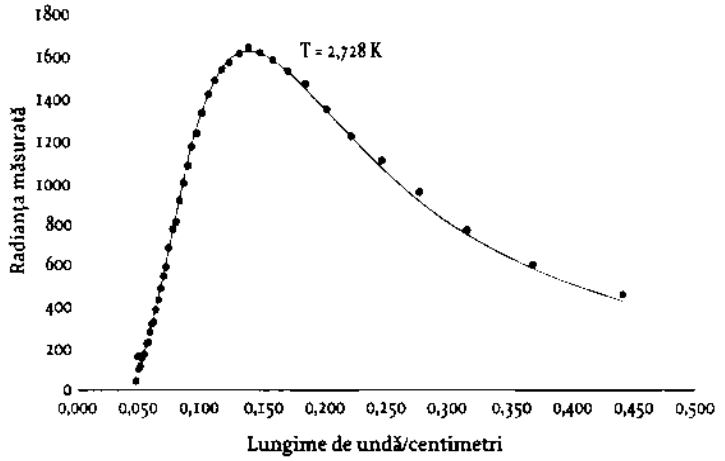


Figura 19. *Măsurătorile radianţei spectrale a radiaţiei cosmice de fond în funcţie de lungimea de undă au fost raportate de echipa COBE în 1990. Spectrul este cel al unui corp negru la o temperatură de 2,728 K. Punctele reprezintă măsurătorile experimentale, iar linia continuă reprezintă predicţia bazată pe spectrul unui corp negru. Adaptat din D.J. Fixsen, E.S. Cheng, J.M. Gales, J.C. Mather, R.A. Shafer şi E.L. Wright, astro-ph/9605054, 10 mai 1996.*

Aceste minuscule variaţii de temperatură au fost măsurate încă şi mai fin de Sonda Wilkinson pentru Anizotropia Microundelor[64] (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP), lansată pe 30 iunie 2001, care era de 45 de ori mai sensibilă decât COBE. Iniţial era prevăzut ca WMAP să furnizeze observaţii ale radiaţiei cosmice de fond timp de doi ani, dar misiunea a fost succesiv prelungită în 2002, 2004, 2006 şi 2008. Datele WMAP au fost comunicate în februarie 2003, martie 2006, februarie

2008 și ianuarie 2010. Figura 20 prezintă harta întregului cer conform rezultatelor a nouă ani de măsurători, raportate în 2010.

Pe 14 mai 2009, Agenția Spațială Europeană (European Space Agency, ESA), cu sprijinul NASA, a lansat satelitul Planck pe o orbită la 1,5 milioane de kilometri de Pământ. Instrumentele de la bordul acestuia aveau o rezoluție unghiulară de 2,5 ori mai mare decât cea obținută cu WMAP. La 21 martie 2013, echipa ESA a oferit cea mai recentă și mai detaliată hartă a temperaturii radiației cosmice de fond pe întregul firmament, prezentată de asemenea în figura 20. Se poate observa îmbunătățirea succesivă a

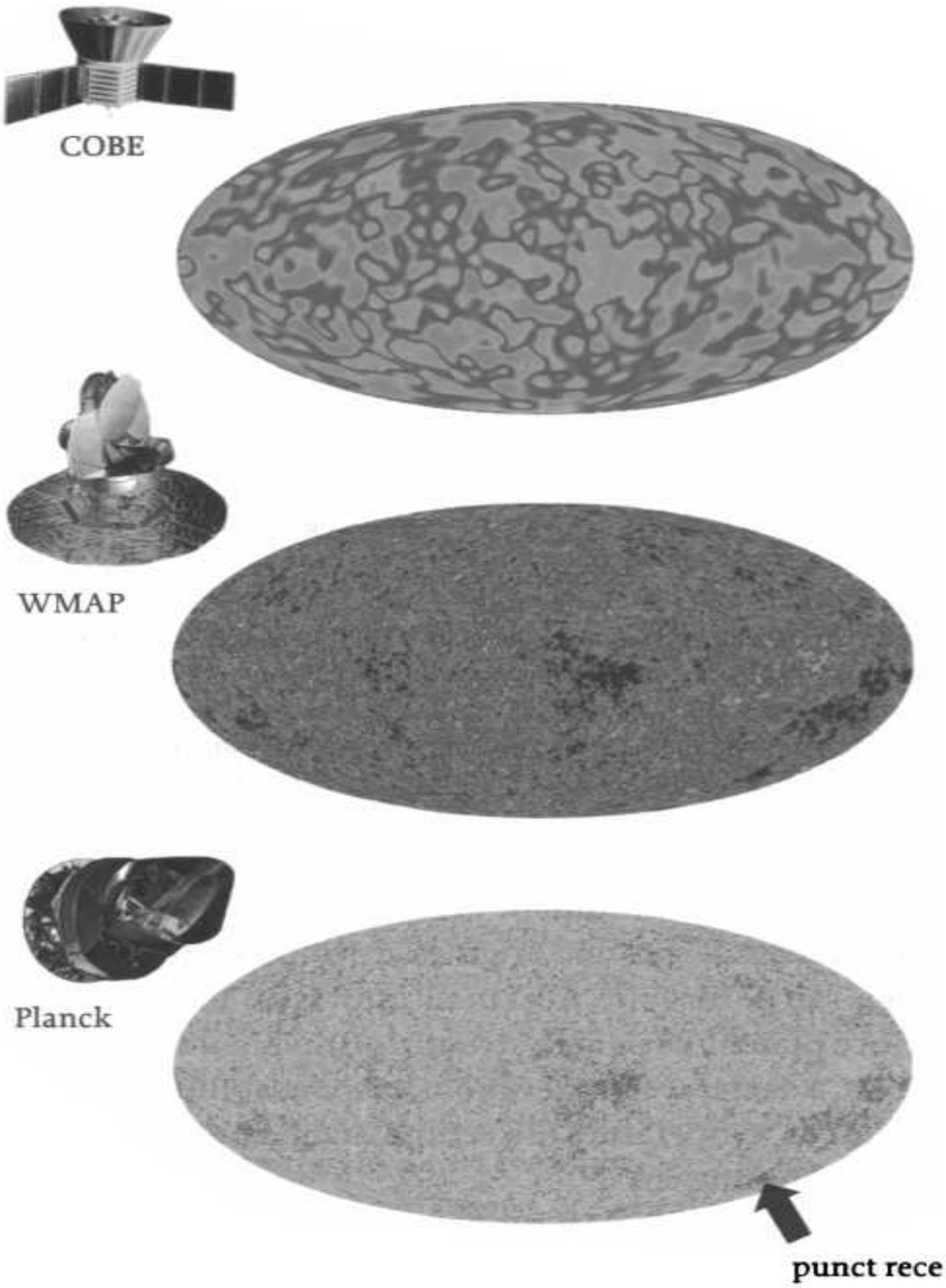


Figura 20. *Harta detaliată a variațiilor de temperatură din radiația cosmică de fond dedusă din datele furnizate de COBE, WMAP (rezultatul a 9 ani de măsurători) și de satelitul Planck. Variațiile de temperatură sunt de ordinul a ± 200 de milionimi de grad și sunt prezentate ca diferențe de culoare, roșul indicând temperaturi mari, iar albastru temperaturi mici. Rezoluția unghiulară a hărții a crescut mult odată cu misiunile succesive.*

rezoluției unghiulare. În toate aceste hărți au fost scăzute variația dipolară și interferența provenită din galaxia noastră. Variația totală de

temperatură este de doar două sute de *milionimi* de grad.

Iată acum răspunsul. Aceste mici variații de temperatură indică mici variaţi ale densității materiei (vizibilă şi întunecată) la momentul recombinării. Aceasta e întreaga variație necesară pentru a declanșa un șir de evenimente care va conduce la structura vizibilă azi în univers. Zonele fierbinți indică densităţi mai mari de materie, germenii pentru formarea viitoarelor stele şi galaxii, iar zonele reci indică densităţi mai scăzute, care vor deveni spaţii vide.

Modelul Λ–CDM

Radiația cosmică de fond nu e singura dovadă observațională în favoarea modelului big bang inflaționar, dar e frapant de concludentă. S-a ajuns la consens în privința cosmologiei big bang inflaționare, numită fie modelul „concordant", fie „modelul standard al cosmologiei big bang", fie modelul Λ–CDM, unde A reprezintă constanta cosmologică introdusă de Einstein în 1917, iar CDM „cold dark matter" (materie întunecată rece). Versiunea evenimentelor prezentate în primele capitole e în linii mari conformă cu acest model. Modelul Λ–CDM se bazează pe șase parametri. Trei dintre ei se leagă de densitatea energiei întunecate, care depinde de mărimea constantei cosmologice, densitatea materiei întunecate reci și densitatea materiei barionice a atomilor neutri de hidrogen și heliu. Acordul dintre teorie și observații e remarcabil. Figura 21 prezintă „spectrul de putere" dedus din pătratele diferențelor de temperatură în radiația cosmică de fond cartografiată de satelitul Planck. Ridicarea la pătrat a diferențelor face ca regiunile reci, unde temperatura scade sub medie, să nu se deosebească de regiunile fierbinți, accentul căzând asupra *mărimii* absolute a variațiilor de pe firmament.

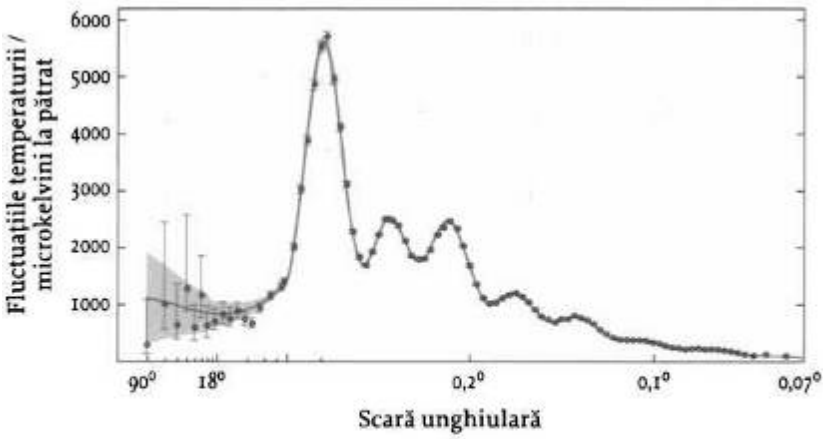


Figura 21. *Variația fluctuațiilor de temperatură (măsurate în microkelvini la pătrat) în funcție de scara unghiulară de-a lungul cerului, conform măsurătorilor satelitului Planck. Datele sunt reprezentate prin puncte cu marjele de eroare asociate, iar predicția modelului Λ-CDM e curba continuă.*

Este un grafic complex, dar e de-ajuns să știm că oscilațiile din spectru sunt rezultatul direct al undelor acustice care se propagau în plasmă până la momentul recombinării. Pozițiile acestor oscilații și amortizarea lor pe scara unghiulară depind critic de parametrii modelului, dar tiparul caracteristic cu un maximum pronunțat, urmat de două maximumuri cam de aceeași înălțime și de oscilații amortizate, poate fi descris suficient de exact de modele hidrodinamice simple care tratează plasma ca pe un fluid. Curba din figura 21 se bazează pe un model în care universul a apărut cu 13,8 miliarde de ani în urmă, energia întunecată reprezintă 68,3% din totalul de masă–energie, iar materia întunecată 26,8%. Materia barionică obișnuită – sau ceea ce consideram până nu demult că ar fi „universul” – reprezintă doar 4,9%. Materia vizibilă e purtată de-a lungul unei mase de materie întunecată cam ca spuma de pe suprafața unui cappuccino. Împingerea produsă de ușoara accelerare a expansiunii spațiului–timp datorată energiei întunecate și atracția gravitațională a materiei întunecate vor modela evoluția universului după Epoca Fotonilor.

4. Luminarea firmamentului

Originea stelelor și galaxiilor

Începe acum procesul lent, dar implacabil, de construire a structurii din mici anizotropii în distribuția materiei pe cuprinsul universului tânăr. Spațiul–timp continuă să se extindă în toate direcțiile, dar expansiunea

e încetinită în acele regiuni unde densitatea materiei e ceva mai ridicată. Anizotropia în distribuţia materiei conduce la creşterea decalajelor dintre ratele de expansiune ale diferitelor regiuni din univers. După cum am văzut în capitolul 1, există trei tipuri de soluţie la ecuaţiile câmpului gravitaţional ale lui Einstein. Aceste tipuri de univers evoluează diferit în funcţie de raportul dintre cantitatea de masă–energie din univers şi rata lui de expansiune. Un univers cu o densitate de masă–energie suficient de mare îşi va încetini în cele din urmă rata de expansiune, pentru ca apoi să colapseze. Un asemenea univers e închis. Un univers cu o densitate de masă–energie insuficientă pentru a opri expansiunea se va extinde la nesfârşit. E un univers deschis.

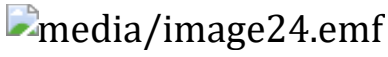
Există aici o asemănare cu traiectoriile obiectelor aruncate în aer. O ghiulea lansată de un tun urmează o traiectorie parabolică. Pe măsură ce se deplasează prin aer, e încetinită, până când forţa gravitaţională a Pământului îşi impune cuvântul, iar ghiuleaua cade spre sol descriind un arc graţios. Putem spune că e o traiectorie închisă. În teorie, un tun foarte puternic ar putea lansa ghiuleaua cu o viteză mai mare decât aproximativ 11,2 km/s, adică prima viteză cosmică. Ghiuleaua s-ar elibera atunci de gravitaţia terestră şi ar evada în spaţiu. Traiectoria ei ar fi deschisă.

Principii asemănătoare se aplică dacă luăm în considerare regiuni individuale de spaţiu–timp *din* univers. Când diferenţele dintre ratele de expansiune ale regiunilor cu densitate mare şi ale celor cu spaţiu–timp „gol” ajung la un factor de aproximativ zece, regiunea cu densitate mare se opreşte din expansiune. Ea se contractă, ajungând la un fel de echilibru. Încep să se formeze structurile. Timpul necesar pentru a avea loc această răsturnare depinde de rata iniţială de expansiune şi de cantitatea de materie din regiune. Diferitele părţi ale universului se contractă deci cu rate diferite şi în intervale de timp diferite.

Această materie e alcătuită din circa 85% materie întunecată şi circa 15% gaz barionic, în principal atomi neutri de hidrogen şi heliu. Dovezile privind existenţa materiei întunecate, pe care nu vi le puteam prezenta în capitolul 2, vor apărea în acest capitol, dar mai întâi trebuie să vorbim despre apariţia galaxiilor.

Când vine vorba de materie întunecată, suntem aproape complet în întuneric, nu știm mai nimic despre ea, dar materia întunecată e esențială pentru fizica formării galaxiilor, conform mecanismului conceput de astrofizicienii Simon White și Martin Rees în 1978, care e acum acceptat cu anumite modificări.[65] Dar cum putem concepe un mecanism bazat pe o substanță pe care n–o putem detecta direct? De fapt, e un lucru pe care oamenii de știință îl fac mereu. Din dovezile pe care le voi prezenta curând, putem deduce multe despre comportamentul materiei întunecate, deși nu știm ce este. Nu sunt doar presupuneri. Calculele bazate pe materia barionică din universul actual demonstrează clar că dacă aceasta ar fi toată materia existentă, atunci nicio parte a universului nu s-ar fi condensat pentru a forma structurile de stele și galaxii pe care le vedem astăzi. Date fiind valoarea anizotropiei deduse din radiația cosmică de fond și mărimea instabilităților gravitaționale rezultante, pur și simplu nu există suficientă materie barionică pentru a contrabalansa expansiunea spațiului–timp. Materia întunecată (orice ar fi ea) e esențială pentru a explica structura la scară mare a universului vizibil.

Halourile de materie întunecată într-o regiune a spațiului–timp unde densitatea materiei e puțin mai mare decât densitatea medie (regiunile unde radiația cosmică de fond e puțin mai fierbinte) surplusul de materie întunecată se acumulează pentru a forma un *halou.* Primele halouri încep să se formeze la 10–20 de milioane de ani după big bang, dar nu sunt încă suficient de mari pentru a exercita o influență gravitațională importantă asupra materiei barionice. Ele apar în univers ca o spuzeală invizibilă.


media/image24.emf

Aceste halouri de materie întunecată sunt mobile, se atrag gravitațional unele pe altele și se contopesc formând halouri mai mari într-un „arbore de fuziune” (figura 22). După încă 100–150 de milioane de ani, halourile devin suficient de mari – exercită suficientă atracție gravitațională – pentru a începe să capteze materia barionică, care se acumulează în interiorul halourilor. Materia barionică se răcește, se condensează și se concentrează.

Formarea halourilor de materie întunecată e un proces lent. Radiația cosmică de fond s-a răcit odată cu expansiunea spațiului–timp, începând din momentul recombinării, spectrul ei de corp negru slăbind în intensitate și deplasându-se către regiunea invizibilă a infraroșului. Cea mai veche lumină a universului a dispărut. Materia barionică, acum captivă în interiorul celor mai mari halouri de materie întunecată, trebuie să se condenseze mai departe pentru a forma stelele. Universul e un dezolant loc întunecat. Bun venit în Epoca întunecată, care se întinde de la 380.000 de ani până la 300 de milioane de ani după big bang.[66]

Primele stele

Materia barionică prinsă în gravitația haloului de materie întunecată se poate acum condensa pentru a forma o protogalaxie de protostele. Deși mecanismul prin care se formează primele stele rămâne încă subiect de dezbatere, majoritatea principiilor fizice sunt în linii mari înțelese. Materia barionică, alcătuită din atomii neutri de hidrogen și heliu apăruți prin nucleosinteza primară și recombinare, se acumulează în haloul de materie întunecată. Repet, evoluția ulterioară a materiei e determinată de competiția dintre energia cinetică a atomilor de gaz (sau temperatura gazului) și forța gravitațională. Dacă energia cinetică e prea mare, norul de gaz va persista, însă un nor cu energie cinetică mică nu are nicio șansă în fața gravitației, care va atrage treptat materia și o va concentra. Nu pot exista deci stele dacă norul capturat de atomi de hidrogen și heliu e prea fierbinte, căci atomii dintr-un gaz fierbinte se mișcă repede și au o energie cinetică mare. Cât de reci trebuie să fie atomii? Pe baza principiilor stabilite în 1902 de fizicianul britanic James Jeans, se pot deduce relații simple între masa critică, densitate (numărul de atomi pe unitatea de volum) și temperatură.

Aceste principii sunt ilustrate în figura 23, care prezintă curbele temperatură–densitate pentru nori de atomi de hidrogen cu diferite mase: de 100 de ori masa Soarelui (care e aproximativ $1{,}99\times10^{30}$ kilograme și se notează cu $M_\odot$), 500 $M_\odot$ și 1000 $M_\odot$. Pentru o masă și o densitate date, un nor cu temperatura deasupra curbei va rămâne nor. Dacă temperatura scade sub curbă, norul colapsează pentru a forma o stea.

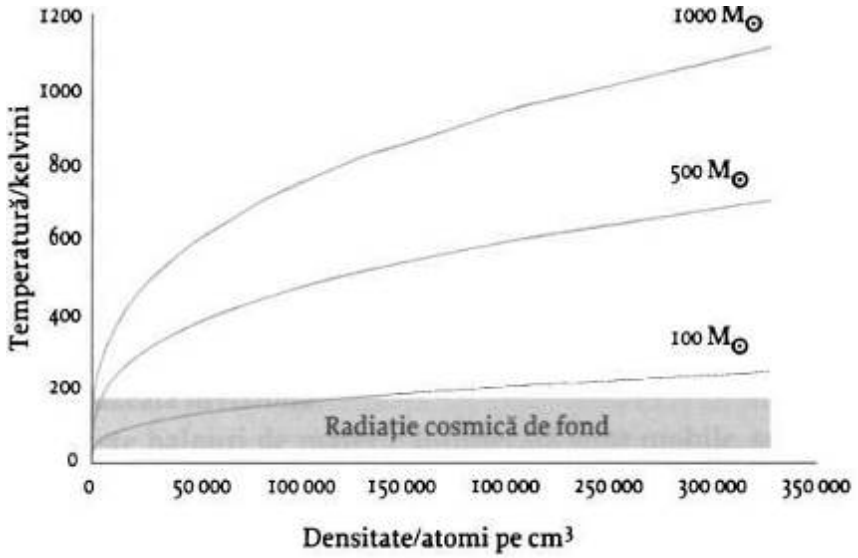


Figura 23. *În 1902, fizicianul britanic James Jeans a elaborat principiile care determină dacă un nor de gaz poate colapsa pentru a forma o stea. Ce se va întâmpla depinde de relația dintre masa, densitatea și temperatura norului, așa cum e ilustrat prin aceste curbe calculate pentru mase de atomi de hidrogen cu valoarea de 100, 500 și 1 000 $M_\odot$, unde $M_\odot$ e masa solară. Pentru o masă și o densitate date, norii cu temperaturi deasupra curbei nu vor colapsa, iar cei cu temperaturi sub curbă vor colapsa. Banda gri indică domeniul de temperatură a radiației cosmice de fond la 30–400 de milioane de ani după big bang. În condițiile existente în universul timpuriu, primele stele trebuie să fi avut mase foarte mari.*

În acest univers timpuriu, temperatura radiației cosmice de fond e încă destul de ridicată (între câteva sute de kelvini și 30 kelvini, în funcție de vârsta universului la momentul contractării norului) și există câteva mecanisme fizice prin care gazul se poate răci. Un mecanism posibil implică răcirea radiativă de către hidrogenul molecular (H_2), format în nor prin unirea atomilor de hidrogen. Această răcire trebuie susținută prin ciocniri, fiindcă H_2 nu radiază de la sine.

De unde provine însă H_2? Există mai multe mecanisme prin care hidrogenul molecular se poate forma din atomi de hidrogen. Cel mai important implică reacția dintre atomii neutri de hidrogen și electronii răzleți: $^1H + e^- \rightarrow 1H^- + \gamma$, unde γ reprezintă un foton. Ionul negativ de hidrogen reacționează apoi cu un alt atom neutru de hidrogen pentru a forma hidrogen molecular: $^1H^- + {}^1H \rightarrow {}^1H_2 + e^-$. Cine a stat în aer liber într-o noapte senină a avut de-a face cu răcirea radiativă: radiația infraroșie (căldura) de la suprafața pielii se disipă în aerul rece. Pe măsură ce atomii de hidrogen și heliu se ciocnesc cu moleculele de

hidrogen din norul de gaz, ei pot transforma o parte din energia lor cinetică în energia vibrațiilor și rotațiilor moleculare. Aceste mișcări moleculare sunt fenomene cuantice complicate, dar ni le putem imagina destul de simplu. Doi atomi de hidrogen se apropie și se îndepărtează ca și cum ar fi legați cu un resort (vibrații), iar molecula se rotește ca bastonul unei majorete (rotații). Cu ajutorul ciocnirilor, energia transferată către aceste mișcări e radiată în spațiul mai rece din jurul norului sub forma microundelor și luminii infraroșii. Nu e un proces prea eficient, dar permite gazului să se răcească până la temperatura radiației cosmice de fond, timp în care gravitația a preluat controlul. Figura 23 ne arată că pentru densități mici, cum ar fi 50.000 de atomi pe centimetru cub sau mai puțin, temperaturi ale norilor de câteva sute de kelvini favorizează formarea stelelor masive.[67] Norul se va fragmenta, pe măsură ce regiuni mai mici din el rup rândurile și trec pragul, colapsând pentru a produce o diversitate de protostele cu mase diferite. În unele simulări recente pe calculator, materia barionică prinsă într-un halou de materie întunecată cu masa de 10^5–10^6 $M_\odot$ produce o distribuție de protostele cu mase între 10 $M_\odot$ și 1000 $M_\odot$, majoritatea concentrate între câteva zeci până la câteva sute de mase solare.[68]

Nucleosinteza stelară

Să ne oprim asupra unei protostele din această categorie. Când gravitația comprimă mai departe gazul, temperatura începe să crească, deci crește energia cinetică a atomilor, însă e prea târziu ca ei să mai scape din ghearele gravitației. Atomii de hidrogen și de heliu își pierd din nou electronii și, pe măsură ce temperatura și presiunea cresc, se inițiază o serie de reacții nucleare. Însă nu e o repetare a șirului reacțiilor implicate în nucleosinteza primară. Să ne amintim că, la câteva sute de secunde după big bang, protonii și neutronii, într-un raport de circa șapte la unu, s-au combinat pentru a produce un amestec de 76% nuclee de hidrogen (protoni) și 24% nuclee de heliu. Toți neutronii erau captivi în nucleele de heliu. Prinși acum în interiorul unei protostele cu temperaturi urcând până la 107K, nu mai există neutroni liberi cu care să interacționeze. În schimb, două nuclee de hidrogen sunt apropiate de gravitație cu o forță suficient de mare

pentru a le face să se combine. Cum anume? Nu există un nucleu atomic stabil compus doar din doi protoni. Unul din protoni suferă o dezintegrare prin intermediul forţei slabe, rezultând un neutron şi o particulă W^+, care preia sarcina pozitivă. Particula W^+ se dezintegrează rapid într-un pozitron (e^+) şi un neutrin electronic (ν_e). Acest proces e opusul dezintegrării beta, în care un neutron se transformă în proton, cu emisia unei particule W^- (care se dezintegrează într-un electron şi un antineutrin electronic). Este un eveniment rar. Apropierea a doi protoni e posibilă doar în condiţiile din interiorul unei protostele care colapsează. Dacă reacţia s-ar produce mai uşor, hidrogenul care se află în interiorul Soarelui s-ar fi epuizat de mult, făcând puţin probabilă apariţia vieţii pe Pământ. Din fericire, când s-a format, Soarele a avut suficient hidrogen pentru a dăinui zece miliarde de ani.

Rezultatul este că două nuclee de hidrogen (^{1}H) se combină pentru a produce un nucleu de deuteriu (^{2}H). Când am vorbit despre nucleosinteza primară, am spus că un nucleu de deuteriu reacţionează cu un nucleu de hidrogen pentru a forma izotopul instabil al heliului (^{3}He), emiţând un foton. Există două scenarii posibile pentru nucleul de ^{3}He. El poate reacţiona cu alt ^{3}He pentru a forma nucleul stabil de ^{4}He, eliberând doi protoni. În Soare, această reacţie are loc în aproximativ 85% din timp. Se mai poate şi ca ^{3}He să reacţioneze cu un nucleu de ^{4}He pentru a produce ^{7}Be, cu emisia altui foton,[69] reacţie care are loc în aproximativ 15% din timp. Aceste reacţii sunt rezumate în figura 24, care ne arată că succesiunea numită lanţul proton–proton (p–p) are trei ramuri.[70]

În prima ramură, numită pp1, rezultatul net este că patru nuclee de hidrogen fuzionează pentru a forma un nucleu de heliu, doi dintre protoni transformându-se în neutroni. Sunt generaţi doi fotoni energetici, câte unul pentru fiecare nucleu de 3He. Cei doi pozitroni produşi în dezintegrarea prin forţa slabă sunt rapid anihilaţi de doi electroni liberi, generând alţi patru fotoni energetici. Dacă însumăm toate masele nucleonilor implicaţi în această ramură a lanţului p–p, găsim o mică discrepanţă, numită *defect de masă.* Aproximativ 0,7% din masa celor patru nuclee de hidrogen a „dispărut”, convertită în aproximativ 26 de milioane de electronvolţi de energie de radiaţie,

conform formulei lui Einstein $E = mc^2$. Un bec de 100W consumă energie într-un ritm de aproximativ 600 de miliarde de miliarde de electronvolți pe secundă, așa încât 26 de milioane de electronvolți nu pare prea impresionant. Dar stați puțin. Aceasta e energia generată de doar *patru* nuclee de hidrogen. Se estimează că în miezul Soarelui reacționează $3{,}7\times10^{38}$ nuclee de hidrogen în *fiecare secundă,* eliberând o energie echivalentă cu aproximativ 4 milioane de miliarde de miliarde de becuri de 100W.

Când halourile de materie întunecată continuă să se contopească și să crească, materia barionică prizonieră în interiorul lor se tot acumulează. Atomii de hidrogen și de heliu se răcesc acum destul de eficient fără ajutorul ciocnirilor cu hidrogenul molecular. Ritmul se intețește pe măsură ce sute de miliarde de furnale nucleare se aprind, și se formează o galaxie. Asta se petrece pretutindeni în univers, urmând tiparul anizotropiilor din distribuția primordială a materiei. Epoca întunecată se încheie, iar în univers este din nou lumină.

Viețile scurte, dar spectaculoase, ale stelelor din Populația a III-a

Stelele care se formează acum nu sunt însă cele pe care le vedem noaptea pe cer. Aceste prime stele sunt formate din materia barionica disponibilă la 300–550 de milioane de ani după big bang, compusă din hidrogen, heliu și cantități infime de elemente mai

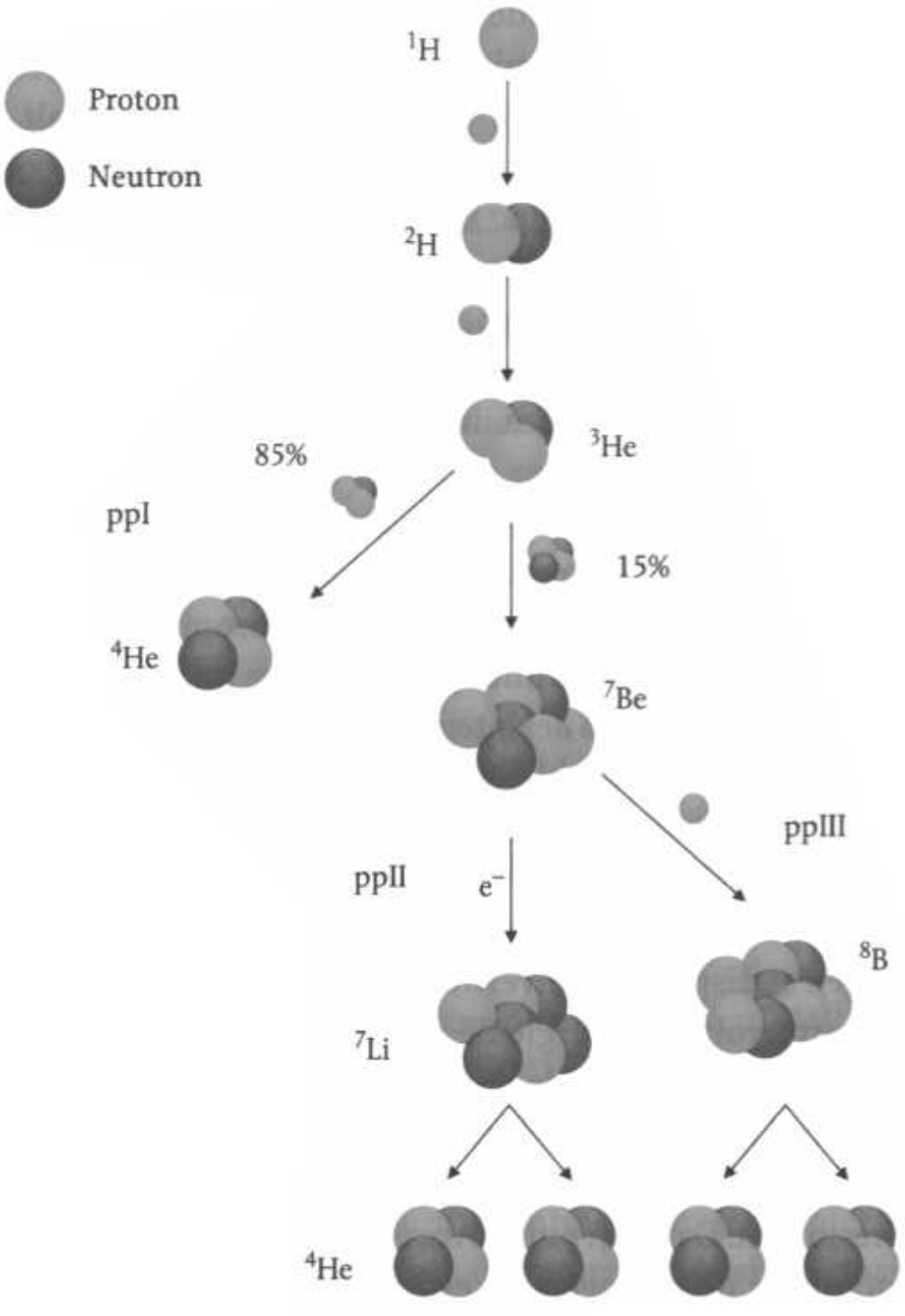


Figura 24. ***Lanţul de racţii nucleare implicate în etapele iniţiale ale nucleosintezei stelare poartă numele de lanţ proton-proton (p-p).***

grele, cum ar fi litiul şi beriliul. Abundenţa relativă a elementelor mai grele decât hidrogenul şi heliul e numită de astronomi *metalicitate.*

Desigur, există multe elemente mai grele care nu sunt metale (de pildă, carbonul, oxigenul și azotul), dar în teoriile evoluției stelare, astronomii le grupează laolaltă, numindu-le „metale”.

Aceste stele din prima generație au deci, prin definiție, o metalicitate foarte scăzută. Ele sunt numite, oarecum derutant, stele din Populația a III-a, dintr-un motiv care se va lămuri curând. Deocamdată n-au fost observate stele din Populația a III-a care să fie vizibile, deci nu avem vreo dovadă empirică privind existența lor, însă avem puternice argumente logice și teoretice care ne fac să credem că ele au fost precursoare esențiale ale stelelor din prezent. Dacă s-au format într-adevăr, atunci (după cum am văzut) aceste prime stele au fost probabil foarte masive, până la câteva sute de $M_{\odot}$. În ciuda rarității primei reacții din lanțul proton–proton, temperaturile și presiunile ridicate din miezul acestor stele le-au făcut să–și consume rapid rezerva de hidrogen. Ele erau mult mai mari și mai luminoase decât stelele pe care le vedem azi, emițând în principal lumină ultravioletă.

Ce se întâmplă când tot hidrogenul din miezul unei asemenea stele se epuizează? Cele trei ramuri ale lanțului proton–proton din figura 24 conduc toate la formarea nucleelor stabile de ^{4}He, iar pe măsură ce se consumă nucleele de ^{1}H, se acumulează nuclee de ^{4}He. Presiunea radiației produse în acest proces ajută la stabilizarea stelei, opunându-se contracției gravitaționale. Când nucleele de ^{1}H s-au epuizat, radiația încetează, iar miezul stelei se contractă, ducând la creșterea temperaturii și presiunii. Când temperatura crește peste 108K, nucleele de heliu fuzionează, eliberând din nou radiație. Temperatura din miezul stelei crește și mai mult, iar odată cu ea crește și rata reacțiilor de fuziune a nucleelor de heliu, provocând o sporire spectaculoasă a luminozității stelei, numită *strălucirea heliului.*

E momentul când ne confruntăm cu absența nucleelor atomice stabile formate din opt nucleoni (figura 25). Este prăpastia care n-a putut fi trecută în condițiile din timpul nucleosintezei primare, la câteva secunde după big bang, motiv pentru care lanțul reacțiilor se termina cu izotopii litiului și beriliului. Însă altele sunt condițiile din interiorul stelelor din Populația a III-a. Acum, două nuclee de ^{4}He se combină pentru a forma un nucleu de ^{8}Be, cu emisia unui foton energetic.

Nucleul de ^{8}Be conţine patru protoni şi patru neutroni, şi e extrem de instabil. În condiţii normale se dezintegrează rapid în două nuclee de heliu (timpul de înjumătăţim al ^{8}Be este de aproximativ 7×10^{-17} secunde). Dar nu avem de-a face cu condiţii normale. În miezul unei stele în care fuzionează heliul există acum şanse ca nucleul de ^{8}Be să întâlnească alt nucleu de ^{4}He înainte de a se dezintegra, fuzionând sub forma nucleului de carbon 12C.[71]

Desigur, probabilitatea e mică, dar ea creşte pentru că nucleul de ^{12}C posedă o stare excitată cu o energie corespunzând îndeaproape sumei energiilor nucleelor de ^{8}Be şi ^{4}He. Această stare excitată asigură o „rezonanţă", oferind nucleelor o modalitate prin care să treacă prăpastia pentru a fuziona. Iată cum putem privi lucrurile: „cada" cu ^{8}Be are două scurgeri; printr-una scurgerea are loc foarte repede înapoi în „cada" cu ^{4}He, iar totul s-ar opri aici dacă n-ar exista rezonanţa care deschide o nouă cale, prin care „cada" cu ^{12}C se umple încă şi mai repede.

Pur şi simplu nu există nici o altă modalitate pentru formarea elementelor grele în interiorul unei stele. Ştim totuşi că elemente precum carbonul şi altele mai grele sunt relativ abundente în universul de astăzi. În

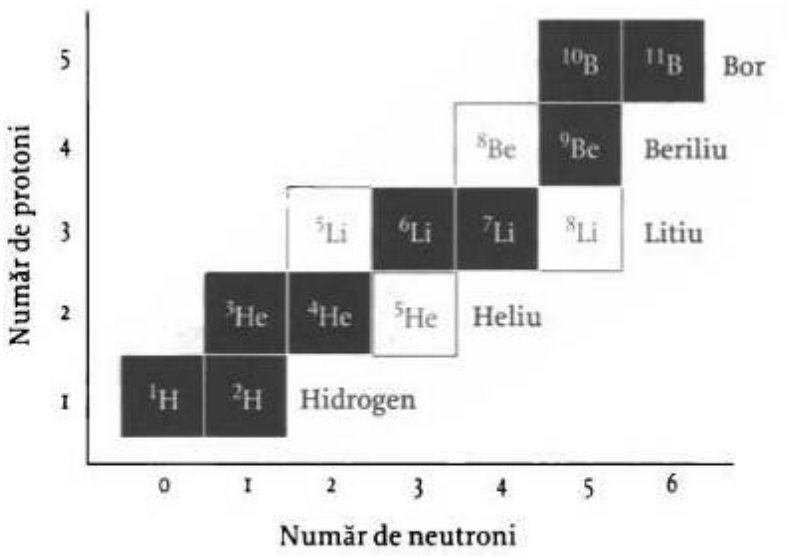


Figura 25. *Adăugarea câte unui proton și câte unui neutron la ^{1}H permite construirea unui șir de elemente stabile (pătratele negre) până la ^{7}Li. Însă aici ne oprim: nu există nuclee stabile cu opt nucleoni. Adăugarea unui proton la ^{7}Li produce un nucleu instabil de ^{8}Be, care se dezintegrează rapid.*

1954, fizicianul britanic Fred Hoyle a conchis că *trebuie* să existe un mecanism care să permită formarea nucleelor ^{12}C înainte de dezintegrarea ^{8}Be instabil. El a prezis existența unei stări rezonante a nucleului de carbon care să ajute la formarea nucleului 12C. Această stare e numită uneori „starea Hoyle" și a fost descoperită în 1957 la o energie foarte apropiată de cea prezisă de Hoyle. Odată format, nucleul ^{12}C poate reacționa cu alt nucleu ^{4}He pentru a forma ^{16}O, nucleul atomului de oxigen. Aceasta deschide o nouă cale de nucleosinteză implicând nuclee de carbon, azot (formate indirect) și oxigen drept catalizatori pentru conversia hidrogenului în heliu și a carbonului în azot și oxigen (figura 26).

Când heliul se epuizează, există alte lanțuri de reacții nucleare care se pot declanșa, implicând combustia carbonului pentru a forma neon, sodiu și magneziu; combustia neonului pentru a forma oxigen și magneziu; combustia oxigenului pentru a forma siliciu; combustia siliciului pentru a forma o diversitate de elemente mai grele, cum ar fi sulful, calciul și fierul. Energia necesară fuziunii nucleelor de fier e mai mare decât cea eliberată, iar când fierul se acumulează în miezul stelei, bătălia cu gravitația e pierdută. Rezultatul e un colaps catastrofal: miezul se contractă cu viteza de peste 1000 km/s. Tot procesul de

creare a nucleelor grele prin nucleosinteză este acum anulat, fiindcă nivelurile intolerabile de radiaţii din miez dezintegrează nucleele de fier în nuclee de heliu, care apoi se dezintegrează în protoni şi neutroni. Protonii se dezintegrează prin forţa slabă, formând un miez aproape pur de neutroni, cu densitatea unui nucleu atomic. Aceste stele au emis o lumină strălucitoare, au dus o viaţă scurtă, dar spectaculoasă, trăind în medie câteva milioane de ani. Acum ele mor.

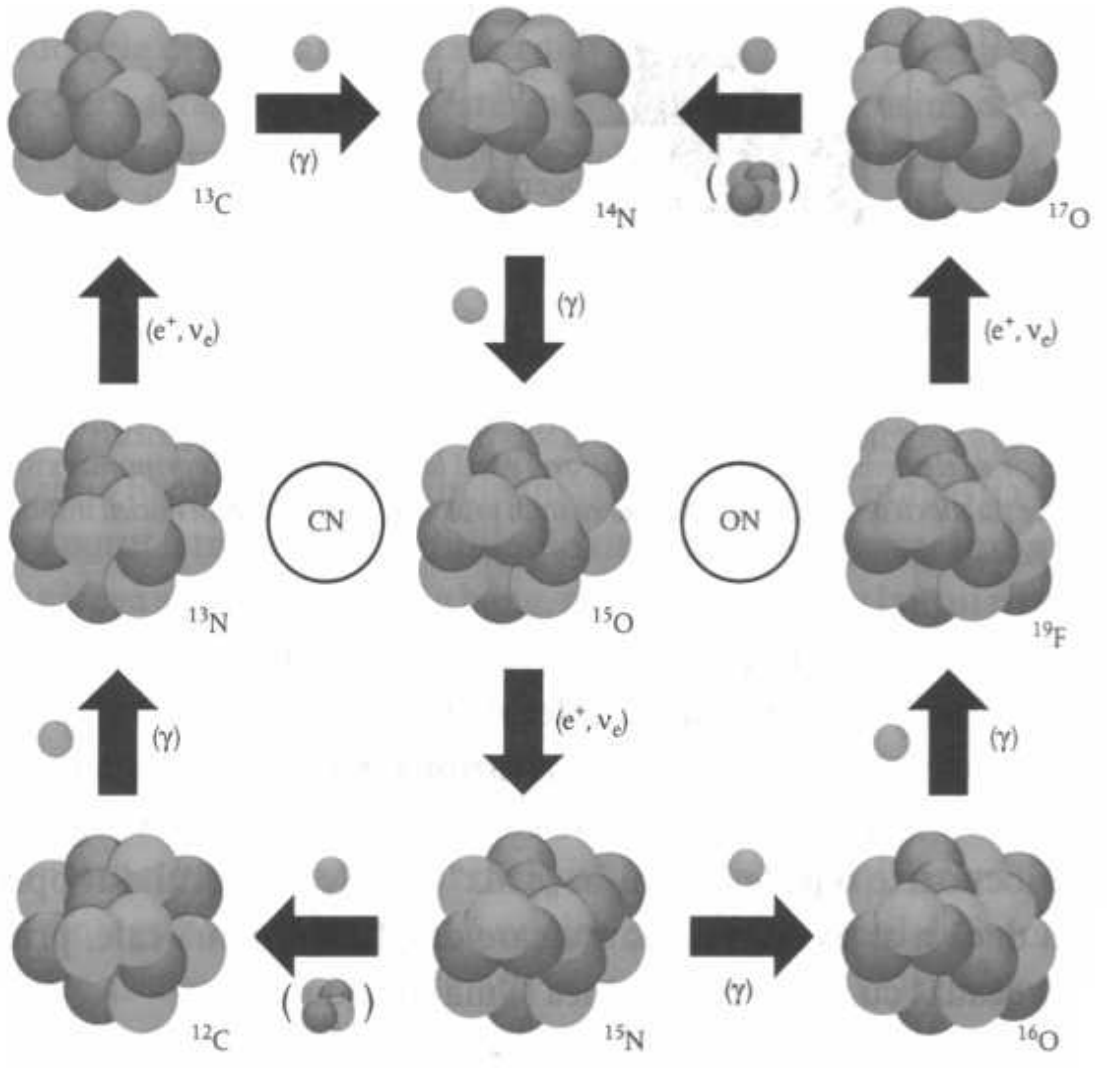


Figura 26. *Ciclul CNO. Izotopii carbonului, azotului și oxigenului formează bucle catalitice închise. Pornind din colțul din stânga jos, un nucleu de ^{12}C captează un proton liber pentru a forma ^{13}N, un izotop al azotului, emițând un foton de energie înaltă (între paranteze în imagine). Acesta suferă o dezintegrare prin forța slabă, emițând o particulă W^+ care se transformă într-un pozitron (e^+) și un neutrin electronic (ν_e) pentru a forma ^{13}C. Acesta captează un proton pentru a forma ^{14}N, și încă un proton pentru a forma ^{15}O, un izotop al oxigenului care se dezintegrează prin forța slabă în ^{15}N. Ciclul CN se închide cu o reacție implicând fuziunea cu un proton și emisia unui nucleu ^4He (particulă alfa), aducându-ne înapoi la ^{12}C. În acest ciclu, patru protoni s-au combinat din nou pentru a produce un nucleu de heliu. Ciclul ON din dreapta face cam același lucru.*

Soarta stelelor din Populația a III-a

Ce se întâmplă mai departe depinde de masa inițială a stelei. În simulările pe calculator menționate mai sus, stelele din Populația a III-a cu mase între 8 $M_\odot$ și 25 $M_\odot$ suferă *un colaps al miezului de tip supernovă.* Forța nucleară tare împiedică un nou colaps al miezului format din neutroni, iar miezul ricoșează, transmițând o undă de șoc prin materia aflată în cădere, care explodează spectaculos. Pentru un scurt moment, steaua strălucește mai intens decât o întreagă galaxie. Energia eliberată în explozie e suficientă pentru a reasambla nucleele grele, până la fier și dincolo de el.

În urma acestui proces rămânem cu o *stea neutronică*, formată în principal din neutroni, cu o masă de 1–3 $M_\odot$ și o rază de doar 5–10 km care se învârte rapid. Pentru comparație, șoseaua de centură a Londrei (numită M_{25}) are o circumferință de 188 km și descrie un cerc în jurul orașului cu raza de aproximativ 30 km. Încap în acest perimetru vreo șase stele neutronice. Steaua neutronică e compusă din neutroni, protoni și electroni, cu cel puțin 200 de neutroni pentru fiecare proton, ceea ce împiedică neutronii să se dezintegreze prin reacții ale forței slabe.

Pentru stelele din Populația a III-a cu mase inițiale de 25–80 $M_\odot$, nici măcar forța tare nu poate face față gravitației, iar ce rămâne după colapsarea miezului într-o supernovă este o *gaură neagră*, un corp atât de masiv și de dens, încât nici măcar lumina nu poate evada de pe suprafața lui. Dimensiunile găurii negre sunt date de raza orizontului evenimentelor, numită și raza Schwarzschild (după fizicianul german Karl Schwarzschild), care definește pragul dincolo de care niciun obiect care cade până acolo nu se mai poate întoarce.

Cum din masa inițială a stelei se pierde ceva în timpul supernovei, masa găurii negre rămase va fi inevitabil mai mică. Dacă ceea ce rămâne are o masă mai mică de 3 $M_\odot$, va continua să existe ca stea neutronică. O gaură neagră de 5 $M_\odot$ are raza Schwarzschild de circa 15 km, iar una de 30 $M_\odot$ are raza Schwarzschild de circa 90 km.

Stelele din Populaţia a III-a cu mase iniţiale de 80–240 $M_\odot$ pot deveni *supernove cu instabilitate a perechilor*, în care fotonii energetici din miezul stelei produc perechi electron–pozitron. Energia dirijată către presiunea radiaţiei care susţinea steaua împotriva gravitaţiei e acum orientată către producerea de perechi. Presiunea radiaţiei scade rapid, iar miezul stelei colapsează. Când presiunea din miezul stelei creşte, se declanşează reacţii termonucleare în care sunt implicate nuclee de oxigen şi siliciu, iar steaua dispare complet. Cele mai mari stele, cu mase iniţiale de peste 240 $M_\odot$, colapsează formând direct găuri negre.

Aproximativ 70% din furnalele nucleare aprinse la sfârşitul Epocii întunecate strălucesc acum pentru scurt timp mai intens decât întreaga galaxie, ca apoi să se stângă. Ele şi-au îndeplinit însă misiunea. Găurile negre rămase se pot contopi pentru a forma găurile negre supermasive care se crede că se află în centrul majorităţii galaxiilor din prezent. Nori de gaz presăraţi cu elemente grele, formate prin nucleosinteză în interiorul primelor stele şi prin energia eliberată de supernove, se adună iarăşi în spaţiul interstelar delimitat de haloul de materie întunecată. Undele de şoc ale supernovelor din apropiere pot accelera procesul.

Ciclul se reia. Prezenţa elementelor grele din nori contribuie la răcirea gazului, permiţând formarea unor stele cu mase mai mici. Pe măsură ce norii colapsează, lanţul p–p este din nou iniţiat. În stelele mai grele, producerea nucleelor de heliu e susţinută de ciclul CNO, fiindcă de data asta nucleele de carbon, azot şi oxigen există deja în norul de gaz. Stelele din Populaţia a II-a care rezultă vor arde mai puţin strălucitor, dar vor fi mai stabile şi vor supravieţui mai mult.

Stele din Populaţia a II-a: diagrama Hertzsprung–Russell

Dacă într-adevăr s-au format, stelele din Populaţia a III-a deschid calea mai modestelor stele din Populaţia a II-a. Galaxiile de stele care se formează acum vor fi cândva recognoscibile. După cum vom vedea, formarea stelelor şi galaxiilor nu e un eveniment, nu are loc o singură dată, ci e un proces care se continuă şi azi.

E greu de stabilit precis vârsta stelelor bătrâne din galaxia noastră, dar una dintre cele mai vechi e o stea din Populaţia a II-a numită HD140283

(„Steaua Matusalem”), la o distanță de 1800 de bilioane de kilometri de Pământ.[72] Avem deci de-a face cu stele vizibile pe cer și le putem studia. Putem prezice în linii mari evoluția lor. Pe măsură ce hidrogenul e consumat, radiația eliberată în interiorul protostelei exercită o presiune opusă autogravitației gazului care îl face să se contracte. Lucrurile nu sunt atât de simple pe cât par. Așa cum o masă de aer cald se ridică în atmosfera terestră, masele de gaz fierbinte din interiorul protostelei se vor ridica în straturile superioare mai reci. Procesele fizice din straturile superioare, implicând ionizarea gazului și producerea radiației de frânare *(bremsstrahlung)* de către nuclee atomice și electroni, nu permit întregii radiații să părăsească suprafața. Cu alte cuvinte, straturile superioare sunt *opace,* capturând o parte a radiației din interiorul protostelei.

Pe măsură ce masele de gaz se răcesc, ele se scufundă la loc spre interior, formând curenți de convecție. Protosteaua devine agitată, iar luminozitatea și temperatura de la suprafață fluctuează violent. Diferențele mari de temperatură între miez și straturile superioare încurajează o convecție și mai puternică. Însă procesele fizice responsabile pentru opacitatea protostelelor depind *invers* proporțional de temperatură – stelele reci sunt mai opace decât stelele fierbinți. Astfel că, pe măsură ce protosteaua continuă să se contracte sub propria ei gravitație, cresc deopotrivă temperatura din centru și cea de la suprafață, iar opacitatea scade.[73] Asta destinde oarecum presiunea; diferențele de temperatură scad, iar curenții de convecție sunt încetiniți și în cele din urmă se opresc. În acest punct, protosteaua ajunge la un *echilibru hidrostatic* și devine stea în toată puterea cuvântului. Atracția gravitațională a materiei din stea e echilibrată de presiunea radiației generate de reacțiile de fuziune a hidrogenului din miezul ei.

Putem urmări ce se întâmplă în continuare cu ajutorul uneia dintre cele mai celebre diagrame din astrofizică – diagrama Hertzsprung–Russell (figura 27), numită după astronomul danez Ejnar Hertzsprung și astronomul american Henry Norris Russell. Este o reprezentare a luminozității stelei în raport cu temperatura efectivă de la suprafața ei. Luminozitatea unei stele se determină pe baza strălucirii ei și a distanței față de Pământ. Temperatura „efectivă” de la suprafață este

temperatura pe care ar avea–o un corp negru perfect cu aceeaşi luminozitate şi aceeaşi rază. Majoritatea stelelor pe care le observăm se află pe fâşia diagonală a luminozităţii, în funcţie de temperatura efectivă de la suprafaţă, numită *şirul principal.* Cu cât temperatura de la suprafaţă e mai mare, cu atât mai strălucitoare şi mai deplasată spre albastru e lumina stelei.

Această diagramă e un instantaneu al stărilor fizice ale diverselor stele privite în acest moment şi de aici. Dacă am putea privi aceleaşi stele evoluând în următoarele milioane de ani, poziţiile lor în diagramă s-ar schimba cu timpul. O stea se alătură şirului principal într-un punct care depinde de masa şi mărimea ei iniţiale, vârsta şi istoria ei evolutivă. Pe măsură ce îşi arde hidrogenul, străluceşte şi urcă în şirul principal. Stelele mari (cu mase de câteva $M_{\odot}$) îşi vor consuma rezervele de hidrogen mai repede, ciclul catalitic CNO dominând producţia nucleelor de heliu. O stea de dimensiunea Soarelui va rămâne aproximativ 10 miliarde de ani în şirul principal, lanţul p–p fiind mecanismul principal pentru producerea heliului.

Când o stea îşi consumă rezerva de hidrogen din miez, atomii de hidrogen din straturile externe îşi încep combustia, iar steaua se umflă, devenind o *gigantă roşie.* În funcţie de dimensiunea stelei, poate începe combustia heliului din miez, ceea ce face să crească din nou diferenţele de temperatură şi să se piardă stabilitatea hidrodinamică. O stea cu masa între 3 $M_{\odot}$ şi 8 $M_{\odot}$ poate suferi pulsaţii termice cataclismice (numite şi *supervânturi*) care evacuează o bună parte din învelişul exterior de hidrogen, reducând masa stelei la mai puţin de 1,4 $M_{\odot}$. Scenariul continuă cam la fel cum am văzut că se petrec lucrurile cu ipoteticele

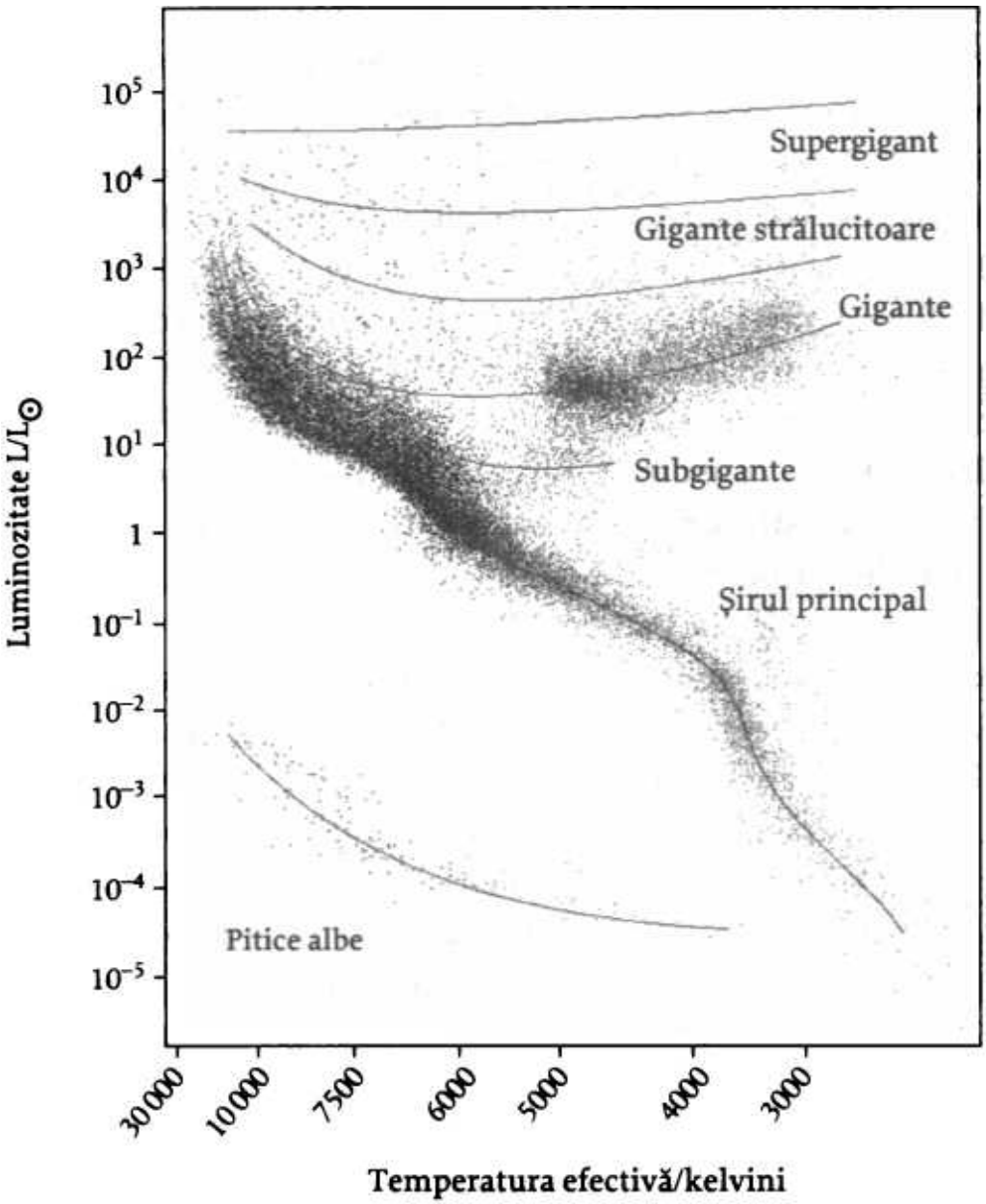


Figura 27 *Diagrama Hertzsprung–Russell reprezintă luminozitatea stelei (L, măsurată în raport cu luminozitatea Soarelui, $L_\odot$) în funcţie de temperatura efectivă de la suprafaţă. Majoritatea stelelor observate se află în fâşia diagonală numită şirul principal. Stelele din şirul principal au drept combustibil hidrogenul. Când hidrogenul e consumat, ele părăsesc şirul principal şi devin gigante roşii. Evoluţia ulterioară poate conduce la pierderea masei prin pulsare termică şi transformarea lor în pitice albe, care emit radiaţie prin răcire radiativă.*

stele din Populaţia a III-a, dar la a doua generaţie a stelelor din Populaţia a II-a, masele sunt mult mai mici. O stea cu masa de sub 0,5

$M_\odot$ nu e suficient de mare pentru a declanșa reacțiile heliu–heliu, iar când lanțul de reacții p–p implicând hidrogenul încetează, steaua rămâne cu un miez în răcire format din heliu inert.

Stelele cu mase inițiale între 0,5 $M_\odot$ și 8 $M_\odot$ declanșează combustia heliului, dar fiindcă pierd atât de multă masă în timpul fazei de gigantă roșie, nu mai sunt suficient de mari pentru a declanșa combustia carbonului. Când se epuizează heliul din miez, ele rămân cu un miez în răcire format din carbon și oxigen. În mod similar, stelele puțin mai mari, cu mase inițiale între 8 $M_\odot$ și 11 $M_\odot$, pot declanșa combustia carbonului pentru a produce neon și magneziu, dar pierderea de masă le împiedică să continue procesul, și rămân cu miezuri din oxigen, neon și magneziu. De vreme ce în miezurile acestor stele nu se mai produc reacții nucleare, ele nu mai strălucesc, dar emit radiație prin răcirea radiativă, cam la fel ca un cărbune scos din foc. Ele poartă numele de *pitice albe* și, strict vorbind, nu mai sunt stele. Stelele care rămân cu o masă mai mare de 11 $M_\odot$ vor produce prin combustie toate elementele până ce se va forma un miez de fier. Știm ce se întâmplă mai departe.

Orbitalii atomici și nivelurile de energie

Vom trece acum de la stele la galaxiile care le găzduiesc, dar pentru început e nevoie să vorbim despre proprietățile și comportamentul atomilor care sunt arși în aceste furnale stelare. Să ne întoarcem la momentul recombinării. Deși nucleele de $^1H^+$ și $^4He^{2+}$ încărcate pozitiv par să caute cu disperare electroni cu care să se combine, este pentru prima dată în istoria universului când acestea se întâlnesc, iar atunci se întâmplă ceva minunat.

Cu toate că e corect să spunem că un nucleu de hidrogen „capturează” un electron pentru a forma un atom neutru de hidrogen într-un proces pe care l-am putea nota prin $^1H^+ + e^- \rightarrow {}^1H^+ + \gamma$, descrierea e simplistă. Am fi tentați să ne închipuim atomul rezultat după modelul sistemului planetar, electronul capturat orbitând în jurul nucleului de hidrogen la o distanță fixă, cam la fel ca Pământul în jurul Soarelui.

Acest model e greșit conceptual și, cred eu, mai puțin atrăgător decât ceea ce știm că se întâmplă. Un electron care se mișcă în câmpul

electrostatic (câmpul coulombian) generat de sarcina protonului central e de așteptat să radieze energie sub formă de lumină. Aceasta e baza tuturor transmisiunilor de radio și televiziune. Energia mișcării orbitale a electronului ar fi imediat emisă, iar electronul ar cădea pe nucleu. Un dezastru. Motivul pentru care nu se întâmplă așa este că aceste particule nu sunt micile bile de biliard din imaginația noastră naivă. Ele sunt unde–particule cuantice, având un comportament cu totul diferit.

De Broglie și-a prezentat ideile despre proprietățile de undă–particulă ale electronului într-o serie de articole publicate în 1923, adunate în teza sa de doctorat susținută la Universitatea din Paris, în care făcea analogii cu muzica. Notele muzicale produse de instrumentele cu coarde sau de suflat rezultă din așa–numitele *unde staționare,* moduri de vibrație care se potrivesc perfect între capetele fixe ale corzii sau pe lungimea tubului. Apariția acestor unde staționare presupune ca înălțimea (sau amplitudinea) la capetele fixe să fie zero. În figura 28 sunt prezentate câteva unde staționare simple.

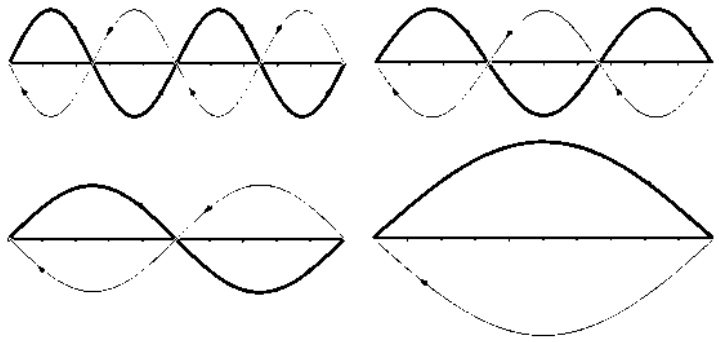


Figura 28. *Exemple de unde staționare. Ele au înălțime sau amplitudine zero la capetele corzii sau ale tubului. Săgeata indică sensul în care se deplasează undele, deși ele par să nu se miște.*

De Broglie s-a întrebat dacă nu cumva unda electronului trebuie să fie staționară atunci când acesta orbitează în jurul nucleului atomic. Simplu spus, când electronul își încheie rotația în jurul nucleului și se întoarce în punctul de pornire, amplitudinea și faza undei asociate trebuie să fie aceleași ca la pornire. Dacă această condiție nu e satisfăcută, unda nu se va alinia cu ea însăși, ci va interfera destructiv, fără să se producă o undă staționară. Era o idee îndrăzneață, iar coordonatorul tezei lui de Broglie i-a trimis un exemplar lui Einstein, pentru a–i cere părerea. Einstein i-a trimis un răspuns încurajator: „El

[de Broglie] a ridicat un colţ al marelui văl."[74] Acest sprijin a fost suficient pentru ca de Broglie să primească titlul de doctor în noiembrie 1924.

Semnificaţia ideii lui de Broglie avea să fie lămurită de fizicianul austriac Erwin Schrödinger. Cu câteva zile înainte de Crăciunul anului 1925, Schrödinger a plecat în Alpii elveţieni pentru o scurtă vacanţă. Avea necazuri în căsnicie şi a invitat o veche prietenă de la Viena să-l însoţească, lăsând–o acasă pe Anny, soţia lui. Şi-a luat cu el şi notiţele despre teza lui de Broglie. Nu ştim cine era prietena, nici ce influenţă a avut asupra lui, dar când s-a întors, pe 8 ianuarie 1926, Schrödinger descoperise o versiune a ceea ce numim azi *mecanica cuantică.*

În esenţă, Schrödinger descoperise modurile staţionare tridimensionale ale undei pentru un electron „orbitând" în jurul nucleului unui atom de hidrogen. Deoarece numai anumite tipuri de unde se „potrivesc", iar fiecare tip e asociat cu o anumită energie, un electron din atomul de hidrogen poate ocupa doar un nivel din mulţimea *nivelelor de energie* discrete. Electronul poate trece de la un nivel de energie la altul prin – aţi ghicit – absorbţia sau emisia fotonilor în tranziţii instantanee numite salturi cuantice. Numim astăzi aceste unde staţionare *orbitali atomici.* Câţiva dintre orbitalii de energie joasă ai electronului în atomul de hidrogen sunt prezentaţi în figura 29, împreună cu nivelurile de energie corespunzătoare.

Nivelurile energetice ale orbitalilor sunt fixe, aşa încât tranziţia de la unul la altul e posibilă doar prin absorbţia sau emisia fotonilor având exact energia egală cu diferenţa dintre cele două niveluri. Spre exemplu, un electron din orbitalul 3d poate emite un foton cu lungimea de undă de 656,28 nanometri (miliardimi de metru) pentru a ajunge pe orbitalul

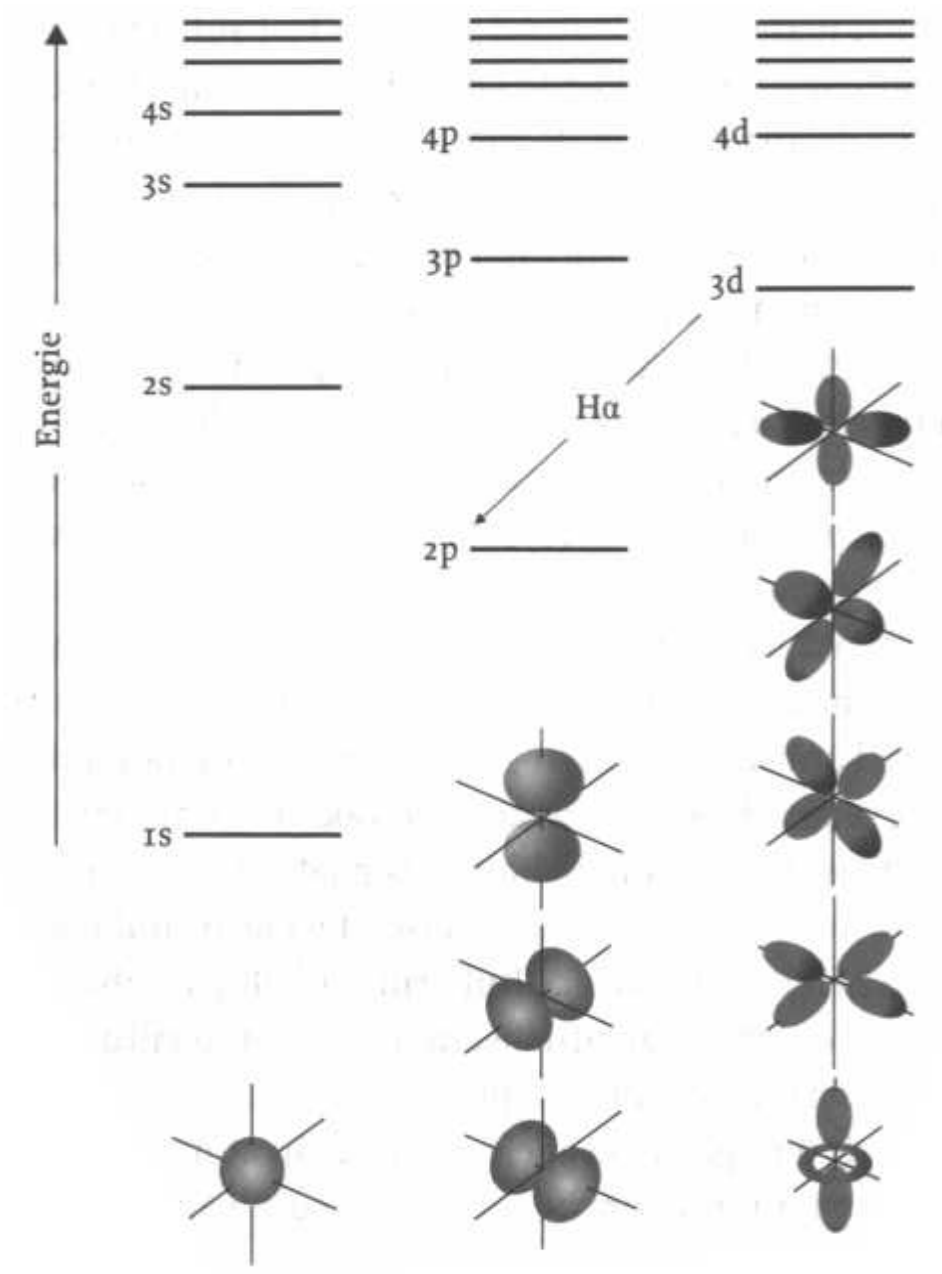


Figura 29. *Câțiva dintre orbitalii atomici ai hidrogenului cu cele mai joase energii. Fiecare orbital reprezintă un model tridimensional de „undă staționară" pentru electronul care orbitează nucleul. De asemenea, sunt prezentate cele mai joase niveluri de energie ale atomului. Un electron din orbitalul 3d care pierde energie căzând pe orbitalul 2p va emite lumină roșie cu lungimea de undă de 656 nanometri – emisie caracteristică numită linia Hα.*

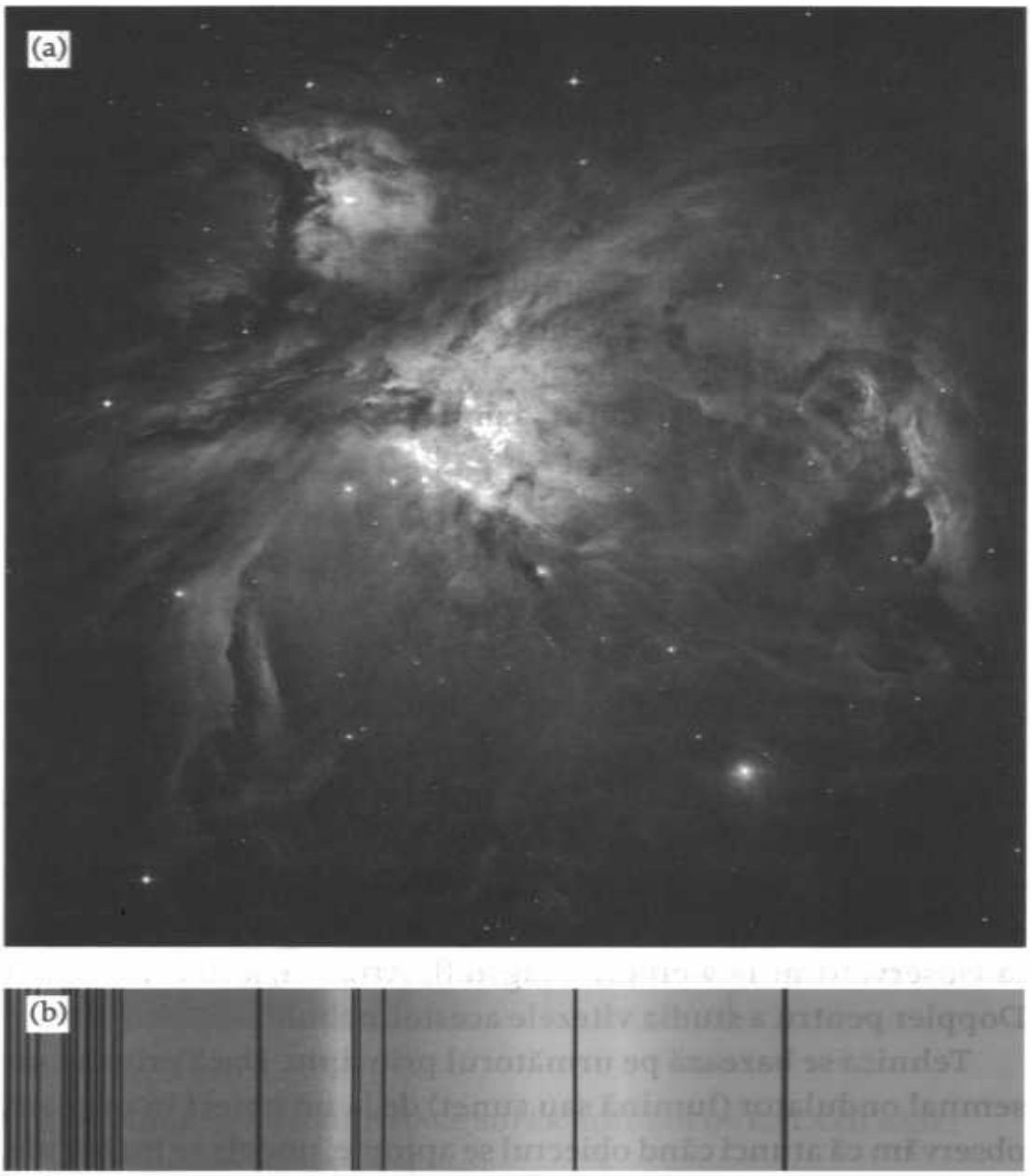


Figura 30. *(a) Emisia Hα a atomilor de hidrogen dă o nuanță roșiatică multor fotografii ale nebuloaselor, cum e cea a nebuloasei Orion. (b) Dacă trecem lumina Soarelui printr-o prismă, vom obține tiparul culorilor curcubeului din spectrul vizibil. Dar dacă privim cu atenție, am putea observa că spectrul e străbătut de o serie de linii întunecate. Acestea reprezintă lungimile de undă ale luminii care au fost absorbite de atomii – inclusiv cei de hidrogen – din straturile externe ale Soarelui. Această imagine ilustrează liniile caracteristice hidrogenului, între care linia Hα din partea roșie a spectrului.*

2p.[75] Aceasta produce o linie de emisie caracteristică, numită linia Hα (H–alfa), în centrul regiunii roșii a spectrului vizibil. Această emisie dă o

nuanță roșiatică multor fotografii ale nebuloaselor, cum e cea a nebuloasei Orion (figura 30(a)).

Rezultatul e un *spectru* de absorbție sau de emisie. Lumina emisă de Soare se întinde pe o gamă largă de frecvențe sau de lungimi de undă. Cea mai mare parte a ei ajunge la noi neschimbată, iar dacă trecem lumina printr-o prismă, vom vedea spectrul de culori al curcubeului. La o privire mai atentă, observăm însă că tiparul curcubeului e străbătut de o serie de linii întunecate (figura 30(b)). La anumite valori precise ale frecvenței, intensitatea luminii scade abrupt. Acestea sunt frecvențele absorbite de atomii de hidrogen din straturile externe ale Soarelui. Liniile corespund diferențelor de energie dintre diverse niveluri energetice. Figura 30(b) prezintă o serie de linii de absorbție ale atomilor de hidrogen (inclusiv linia Ha) care străbat spectrul vizibil.

Deplasarea spre roșu, lumânările standard și legea lui Hubble

Spectrele de absorbție și emisie atomică ne oferă o metodă de a determina compoziția stelelor îndepărtate, dar și viteza cu care se deplasează stelele și galaxiile, precum și distanța până la ele. În 1912 se credea că universul e compus doar din cele câteva sute de miliarde de stele din Calea Lactee, între care se aflau obiecte difuze numite *nebuloase*. Astronomul american Vesto Slipher de la Observatorul Lowell din Flagstaff, Arizona, a folosit efectul Doppler pentru a studia vitezele acestor nebuloase.

Tehnica se bazează pe următorul principiu. Dacă primim un semnal ondulator (lumină sau sunet) de la un obiect în mișcare, observăm că atunci când obiectul se apropie, undele se înghesuie, frecvența fiind mai mare decât cea a undei emise, iar când obiectul se îndepărtează, undele se distanțează, frecvența scăzând. Efectul e observat de oricine aude sirena unei ambulanțe sau a unei mașini de poliție trecând prin dreptul lui. Cunoscând frecvența emisă de sursă (măsurată, de pildă, în laborator) și frecvența detectată, diferența dintre ele ne dă viteza cu care se mișcă sursa spre noi sau dinspre noi. Dacă lumina e emisă de atomii dintr-o nebuloasă care se deplasează în raport cu Pământul, frecvențele spectrale vor fi deplasate cu o valoare depinzând de viteza nebuloasei (figura 31). Liniile spectrale ale unui obiect care se

îndepărtează cu viteză mare sunt deplasate spre roşu (b) în comparaţie cu aceleaşi frecvenţe emise de Soare (a).

Slipher a folosit în observaţiile sale două linii din spectrul atomului de calciu. Spre sfârşitul anului 1912, el a descoperit că lumina de la nebuloasa Andromeda e deplasată spre albastru (frecvenţe mai înalte sau lungimi de undă mai mici), sugerând că aceasta se *apropie* de noi cu o viteză de 300 km/s. Dar pe măsură ce a adunat noi date despre alte nebuloase timp de cinci ani, a găsit că majoritatea – 21 din 25 (84%) – prezintă o deplasare spre roşu (frecvenţe mai joase sau lungimi de undă mai mari), sugerând ele se îndepărtează cu viteze de până la 1100 km/s. Era ciudat. Dacă toate nebuloasele se aflau în Calea Lactee, de ce majoritatea se îndepărtau de noi cu viteze atât de mari? S-a lansat ipoteza că nebuloasele nu sunt obiecte difuze din galaxia noastră, ci galaxii de sine stătătoare (sau „universuri insulare"). Disputa din aprilie 1920 dintre astronomii americani Harlow Shapley (care susţinea că nebuloasele se află în interiorul Căii Lactee) şi Heber Curtis (care susţinea că sunt galaxii) s-a încheiat nedecis.

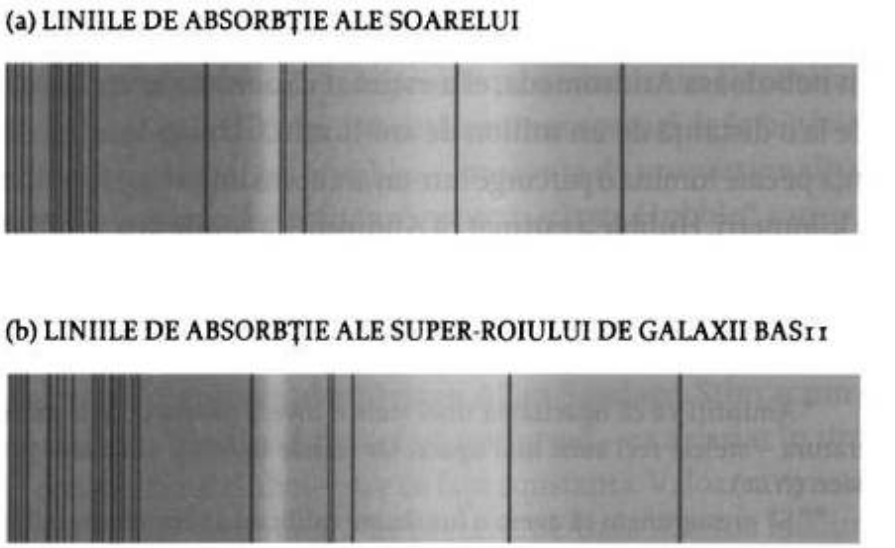


Figura 31. *Liniile de absorbţie atomică suprapuse pe spectrul de lumină al Soarelui (a) sunt deplasate spre roşu în lumina unui obiect aflat la mare distanţă, care se îndepărtează de noi, (b). Din valoarea deplasării spre roşu putem calcula viteza obiectului.*

Problema a fost lămurită în decembrie 1924. Astronomul american Edwin Hubble a descoperit că în interiorul unor nebuloase există câteva stele care prezintă caracteristici similare celor ale stelei Delta Cephei

din constelația Cefeu. Aceste stele, numite *variabile cefeide*, sunt supergigante galbene, care suferă pulsații luminoase regulate, determinând schimbări periodice în opacitate. Când o variabilă cefeidă se contractă, aceasta se încălzește, devine mai puțin opacă și se dilată.[76] Este eliberată radiație: steaua emite un puls strălucitor de lumină. Dar când se răcește, devine mai opacă și nu mai radiază. Steaua se contractă, iar ciclul se reia.

Cercetări astronomice anterioare stabiliseră o relație între ritmul pulsației și luminozitatea cefeidelor, iar Hubble a înțeles că acestea pot reprezenta „lumânări standard".[77] Măsurând cu precizie ritmul pulsațiilor și luminozitatea lor *aparentă,* Hubble a calculat distanța până la ele. Folosindu-se de variabilele cefeide din nebuloasa Andromeda, el a estimat că aceasta ar trebui să se afle la o distanță de un milion de ani-lumină. Un an-lumină e distanța pe care lumina o parcurge într-un an, aproximativ 9500 miliarde de kilometri. Hubble a estimat că Andromeda se află la 9,5 miliarde de miliarde de kilometri de Pământ, cu mult în afara Căii Lactee.[78] Peste noapte, nebuloasa Andromeda a devenit *galaxia Andromeda.*

După ce a stabilit distanțele până la câteva galaxii apropiate, Hubble a folosit valorile deplasării spre roșu măsurate de Slipher pentru pentru a stabili o corespondență între viteze și distanțe, și a ajuns la o concluzie remarcabilă. Galaxiile se îndepărtează de noi cu viteze direct proporționale cu distanțele până la ele. Împreună cu asistentul său Milton Humason, Hubble a extins apoi setul de date pentru a include mai multe galaxii și a confirmat relația dintre viteză și distanță, cunoscută ca legea lui Hubble.[79] Nu exista decât o singură explicație: universul se extinde. La prima vedere, faptul că majoritatea galaxiilor se îndepărtează de noi pare să ne plaseze într-o poziție privilegiată, în centrul universului, dar amintiți-vă că într-un univers în expansiune, spațiul–timp este cel care se extinde, fiecare punct din spațiu–timp depărtându-se de toate celelalte puncte. Analogia standard e să privim universul tridimensional ca pe suprafața bidimensională a membranei unui balon. Dacă acoperim suprafața balonului cu puncte așezate la distanțe egale, când umflăm balonul, toate punctele se îndepărtează unele de altele. Cu cât sunt mai îndepărtate între ele, cu atât par să se deplaseze mai

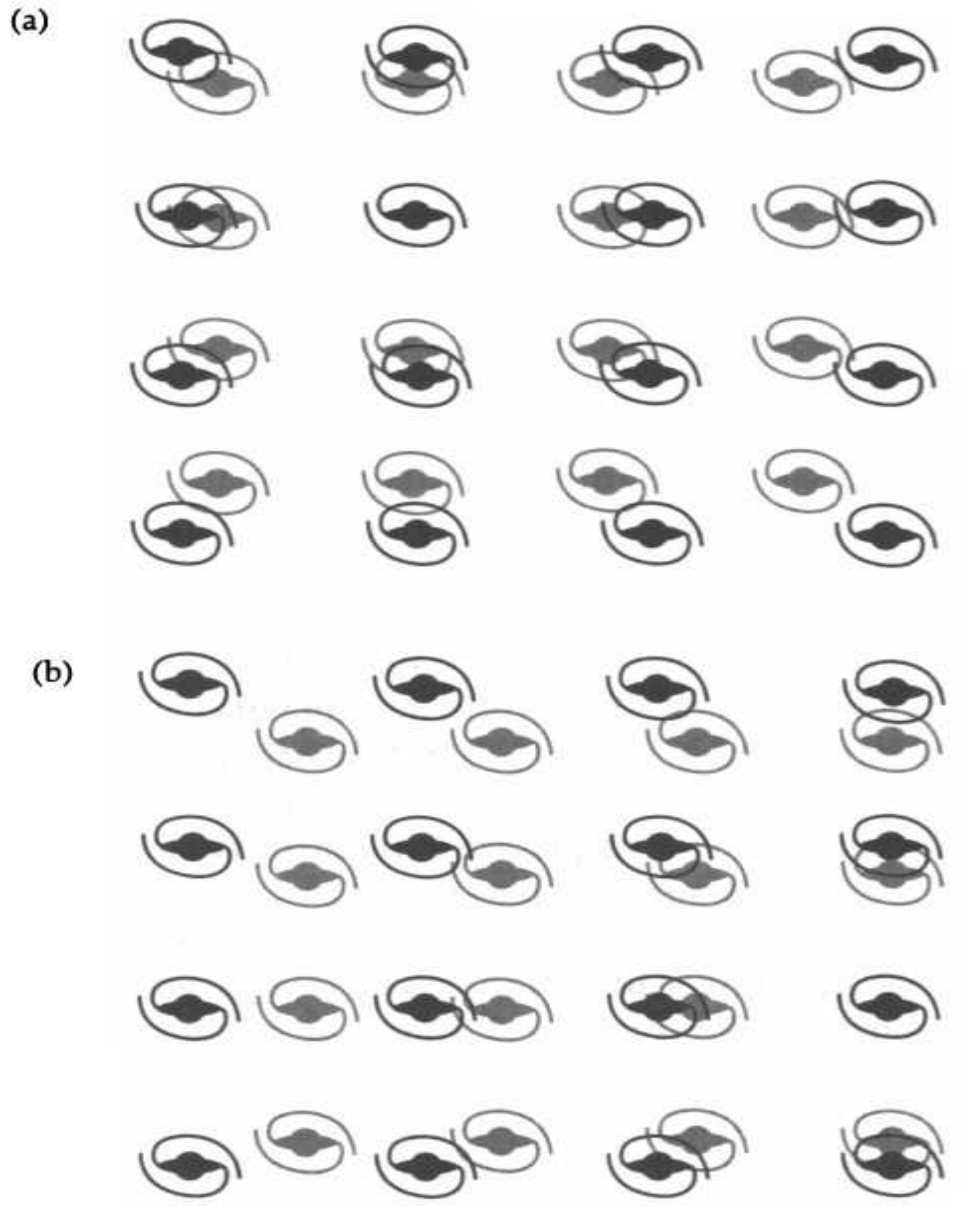


Figura 32. *Să ne imaginăm un univers cu o distribuție uniformă a galaxiilor. Modelul în gri reprezintă universul la un moment dat, iar modelul în negru reprezintă distribuția puțin mai târziu, după ce universul s-a extins. Să privim din două puncte de observație diferite. Din perspectiva galaxiei aflate pe rândul 2, coloana 2 din (a), toate galaxiile din jur s-au îndepărtat, galaxiile de la distanță mai mare părând că s-au îndepărtat mai mult. În (b) ne fixăm asupra galaxiei din rândul 3, coloana 4. Rezultatul e același – toate galaxiile s-au îndepărtat, iar cele aflate la distanțe mai mari s-au îndepărtat mai mult. Prin urmare, dacă vedem că majoritatea galaxiilor se îndepărtează de noi, nu înseamnă că ne aflăm în centrul universului.*

repede (vezi figura 32, unde în loc de puncte sunt desenate galaxii).[80]

Mai existau o mulțime de probleme nerezolvate. Dacă relația dintre viteza galaxiilor și distanță a rămas aceeași de la big bang, inversul constantei lui Hubble – constanta de proporționalitate dintre ele – ne oferă o estimare pentru „vârsta Hubble" a universului.

Articolul inițial al lui Hubble sugera că universul are doar două miliarde de ani, fiind *mai tânăr* decât Pământul, conform estimărilor curente. Lucrurile au fost lămurite în anii 1950, mai cu seamă de astronomul american Allan Sandage. Știm acum că expansiunea universului n-a fost uniformă – ea a variat în timp, deci constanta lui Hubble nu e de fapt constantă. Valoarea constantei lui Hubble determinată în prezent pe baza datelor misiunii Planck este de 67,80 ± 0,77 km/s pe megaparsec.[81] O galaxie care se îndepărtează cu 1000 km/s se află la o distanță de 1000 împărțit la 67,8, adică 14,7 megaparseci (48 de milioane de ani-lumină sau 450 de miliarde de miliarde de kilometri).

Studii ale deplasării spre roșu

Lăsând la o parte atracția gravitațională locală exercitată de galaxiile și roiurile de galaxii din vecinătate, într-un anumit sens galaxiile care sunt antrenate de expansiunea spațiului–timp de fapt nu se mișcă. Ne gândim că un obiect se deplasează cu o viteză oarecare în raport cu un sistem fix de coordonate, dar în acest caz înseși coordonatele se deplasează. La scară cosmologică, deplasarea spre roșu a luminii provenite de la obiecte îndepărtate reprezintă un fel de „diluare" a frecvenței sale, lumina fiind „întinsă" de expansiunea spațiului dintre obiect și observator. Prin urmare, deplasarea spre roșu a obiectelor astronomice, cum ar fi galaxiile, nu se datorează propriu–zis efectului Doppler, care se aplică obiectelor mișcându-se în sisteme de referință spațiale fixe (deși e adesea confundată cu deplasarea Doppler), ci este o deplasare spre roșu *cosmologică,* produsă de obiecte staționare (sau în mișcare relativ lentă, datorită atracției gravitaționale a obiectelor din vecinătate) într-un spațiu–timp în expansiune.[82]

Deplasarea spre roșu a unui obiect, de pildă o galaxie, se exprimă în funcție de parametrul z, care reprezintă diferența dintre lungimea de undă observată și cea efectivă (măsurată într-un laborator de pe Pământ) a liniilor spectrale, împărțită la lungimea de undă efectivă. De exemplu, dacă găsim că linia roșie Ha emisă de atomii de hidrogen

dintr-o galaxie îndepărtată e deplasată spre roşu până la 658,47 nanometri, diferenţa fiind deci de 2,19 nano–metri, atunci z este 2,19 nanometri împărţit la 656,28 nanometri, adică 0,00333. Valorile pozitive ale lui z indică o deplasare spre roşu, iar cele negative o deplasare spre albastru. Pentru galaxiile care se deplasează cu viteze mult mai mici decât viteza luminii, z este aproximativ raportul dintre viteza galaxiei şi viteza luminii.[83] Invers, dacă z este cunoscut din măsurarea lungimilor de undă, atunci poate fi determinată viteza galaxiei înmulţindu-l pe z cu viteza luminii. Un z de 0,00333 indică o viteză de 1000 km/s. Folosind o aritmetică simplă, legea lui Hubble ne dă o estimare a distanţei până la galaxie. O viteză de 1000 km/s corespunde (după cum am văzut mai sus) unei distanţe de 48 de milioane de ani-lumină.[84]

În capitolele 1–3 am spus că radiaţia cosmică de fond se răceşte pe măsură ce universul se extinde, fără a explica limpede motivele, dar acum înţelegem de ce se întâmplă aşa – radiaţia cosmică de fond suferă o deplasare spre roşu cosmologică. Dacă ne întoarcem la figura 14 (a), vedem că la temperatura de 3000 K, curba corpului negru îşi atinge maximumul în jurul valorii de 1000 nanometri, în regiunea infraroşie a spectrului electromagnetic. Figura 14 (b) prezintă aceeaşi curbă pentru temperatura de 3K, iar maximumul e atins pe la 0,1 centimetri. În acest caz, lungimea de undă „efectivă" sau iniţială este mult mai mică decât cea observată, aşa încât e neglijabilă când calculăm diferenţa, deci putem estima că z este 0,1 centimetri împărţit la 1000 de nanometri, adică 1000. Nu e o coincidenţă faptul că această valoare corespunde raportului dintre temperaturile de 3000 K şi 3 K. De fapt, valoarea măsurată a temperaturii radiaţiei cosmice de fond e ceva mai mică de 3K. Dacă folosim temperatura de 2,728 K, conform figurii 18, obţinem un z de 1100, aproape de valoarea dedusă din datele misiunii Planck.

Înarmaţi cu tehnici pentru determinarea vitezelor galaxiilor şi a distanţelor până la ele, astronomii s-au apucat să cartografieze structura universului. Primul studiu privind deplasarea galactică spre roşu, realizat la Centrul pentru Astrofizică Smithsonian de la Harvard (CfA), a început în 1977, iar colectarea primelor date s-a încheiat în 1982. Un al doilea studiu a fost iniţiat în 1985 şi a continuat timp de zece ani. A fost urmat de Studiul Deplasării Galactice spre Roşu în Câmp

de Două Grade ($_2$dF) la Observatorul Anglo–Australian (în prezent, Observatorul Astronomic Australian) de lângă Sydney, între 1997 și 2002. Rezultatele au fost prezentate în iunie 2003. Studiul Sloan Digital al Cerului, numit după Fundația Alfred P. Sloan (un finanțator important), a început să colecteze date la Observatorul Apache Point din New Mexico în 2000, iar cele mai recente rezultate au fost comunicate în iulie 2013.

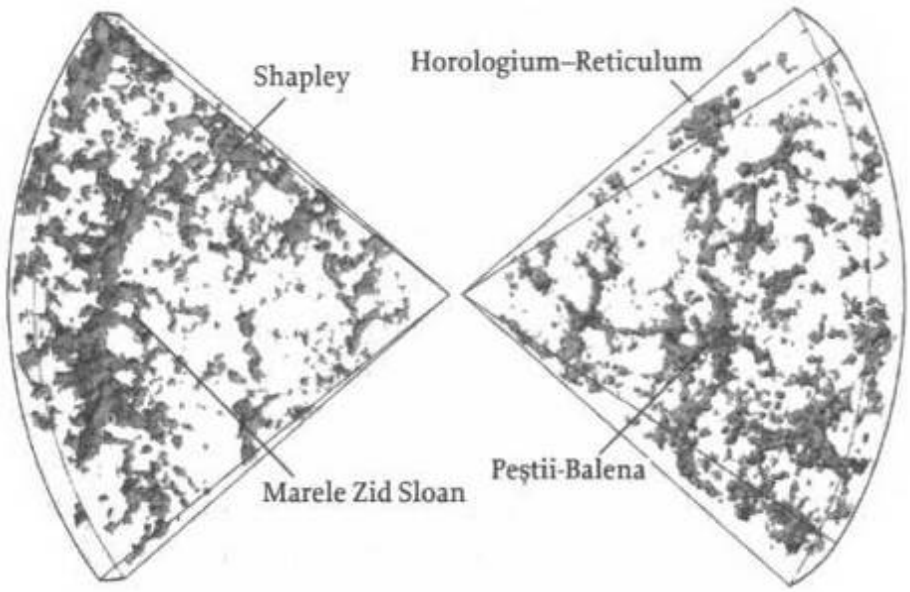


Figura 33. *Secțiune a hărții deplasării galactice spre roșu în emisferele nordică și sudică (în raport cu planul Căii Lactee), măsurată în studiul 2dF. Harta ilustrează structurile imense compuse din super-roiuri de galaxii, unele dintre cele mai mari structuri cunoscute din universul vizibil. Tiparul filamentelor, zidurilor și spațiilor goale reflectă anizotropia distribuției materiei din universul timpuriu.*

Aceste studii au dezvăluit structura universului vizibil menționată deja în capitolul 3. De exemplu, figura 33 prezintă rezultate ale studiului 2dF în care apar câteva super–roiuri de galaxii, care alcătuiesc unele dintre cele mai mari structuri din univers. Conglomeratul Shapley din constelația Centaurul, numit după Harlow Shapley și aflat la distanța de 650 milioane de ani-lumină, are o deplasare spre roșu z de 0,046, ceea ce arată că se depărtează cu 13.800 km/s. Super–roiul Horologium Reticulum din constelațiile Orologiul și Eridanul are o lungime de 550 milioane de ani-lumină și conține o masă vizibilă de 1017 $M_\odot$. Acesta se află la o distanță de 700 milioane de ani-lumină, iar deplasarea spre roșu este de 0,063 (18.900 km/s).

Complexul de super–roiuri Peștii–Balena e format din multe super–roiuri întinse pe o lungime de un miliard de ani-lumină. Cel mai apropiat roi din acest complex se află la distanța de 540 milioane de ani-lumină, cu o deplasare spre roșu z de 0,039 (11.700 km/s). Cel mai îndepărtat grup se află la distanța de 970 de milioane de ani-lumină, cu un z de 0,072 (21.600 km/s). Acest complex include și super–roiul Fecioara, în care găsim Grupul Local, roiul de galaxii din care fac parte Calea Lactee și Andromeda. Marele Zid Sloan e un filament de roiuri de galaxii care până recent era cel mai mare obiect din universul vizibil. Are o lungime de 1,38 miliarde de ani-lumină și se află la o distanță de un miliard de ani-lumină, cu o medie a lui *z* de 0,078 (23.400 km/s). Între toate aceste filamente, ziduri și super–roiuri se află mari zone de vid. Aceste tipare sunt moștenirea tiparului anizotrop al radiației cosmice de fond din figura 20. E imposibil de stabilit o corespondență între aceste tipare, nu doar pentru că rezoluția unghiulară a hărții întregului cer e insuficientă, dar și pentru că ultima suprafață de împrăștiere care a produs aceste imagini se află acum la o distanță de aproximativ 40 de miliarde de ani-lumină.

Tipuri de galaxii, curbe de rotație și materia întunecată

Tipul de galaxie care se va forma într-un halou de materie întunecată depinde de condițiile inițiale ale haloului și de norul de materie barionică ce se acumulează. Dacă norul are inițial un mic moment cinetic – cu alte cuvinte, dacă se rotește atunci rezultatul va fi un disc subțire sau o galaxie spirală. Există mai multe tipuri de galaxii spirale, în funcție de natura brațelor lor. După cum sugerează și numele, galaxiile spirale cu bare au brațe pronunțate, ca niște bare. La galaxiile spirale normale, brațele sunt mai puțin pronunțate. Fiecare tip de galaxie spirală e apoi clasificat în funcție de densitatea stelelor din protuberanța centrală (deci de strălucire) și de gradul de înfășurare a brațelor în jurul protuberanței centrale (figura 34).

În afară de galaxiile spirale, mai există și galaxii eliptice, clasificate pe o scară de la 0 la 7 în funcție de dimensiunile elipsei: E_0 este aproape sferică, iar E_7 (nu apare în figura 34) este alungită de-a lungul axei mari. Când astronomul american Edwin Hubble a propus această clasificare, se credea că galaxiile eliptice sunt galaxii tinere care urmează să se

transforme în galaxii spirale, dar acum știm că ele sunt destul de vechi și că probabil s-au format prin contopirea unor galaxii spirale învecinate.[85] Hubble a identificat un tip intermediar de galaxii, între cele eliptice și cele spirale, numite galaxii lenticulare sau S_0. În fine, există galaxii neregulate (numite Im și IBm în figura 34) care nu se încadrează în niciuna dintre aceste categorii.

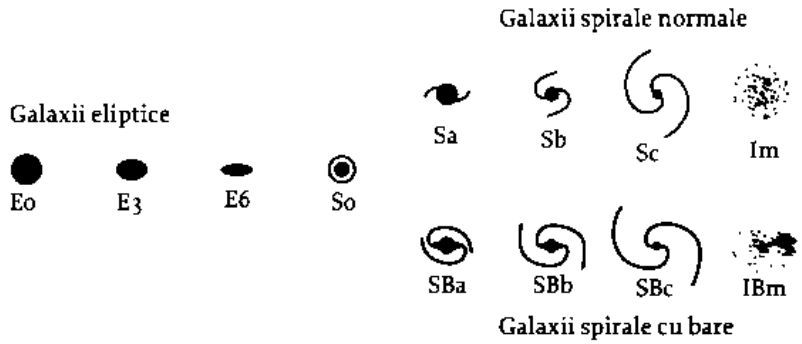


Figura 34. *Hubble a clasificat galaxiile în funcție de forma lor. Galaxiile spirale sunt fie cu bare, fie normale, cu subcategorii pentru fiecare (notate a, b și c), în funcție de densitatea de stele din protuberanța centrală. Galaxiile eliptice sunt clasificate în funcție de dimensiunea elipsei. Alte categorii includ galaxiile lenticulare sau So și galaxiile neregulate. Adaptat după R.G. Abraham, astro-ph/9809131 v1, 10 septembrie 1998.*

Când o galaxie se rotește, stelele orbitând în jurul centrului ei, mecanica newtoniană prezice o relație perfect logică între masa galaxiei și vitezele orbitale ale stelelor la diferite distanțe de centru. Relația depinde de echilibrul dintre forța centrifugă și atracția gravitațională. Pornind din centru, am putea prezice că vitezele orbitale cresc până la o valoare maximă, iar apoi scad. Stelele aflate chiar la marginea galaxiei simt mult mai slab atracția gravitațională, și e de așteptat să se deplaseze mai încet.

Faptul că am spus „prezice” și „e de așteptat” sugerează că lucrurile nu stau chiar așa. Astronomul elvețian Fritz Zwicky a fost primul care a simțit că se întâmplă ceva ciudat. În 1934 el a publicat rezultatele observațiilor asupra roiului Părul din constelația Părut Berenicei, care conține peste o mie de galaxii identificate. (Chiar dacă e vorba de un roi de galaxii, și nu de una singură, principiile sunt aceleași.) El a folosit observațiile mișcărilor orbitale ale galaxiilor din apropierea marginii, combinate cu mecanica newtoniană, pentru a estima masa totală a roiului, apoi a comparat această valoare cu altă estimare făcută pe baza numărului galaxiilor observabile și a strălucirii totale a roiului. A fost

șocat să constate că estimările difereau cu un factor de 400. După studii ulterioare discrepanța a scăzut, însă rămâne importantă.

Masa, prin urmare gravitația, galaxiilor vizibile din roi este mult prea mică pentru a explica vitezele galaxiilor care orbitează la periferie. Nu mai puțin de 90% din masa necesară pentru a explica dimensiunea efectelor gravitaționale pare să „lipsească" sau să fie invizibilă. Zwicky a dedus că trebuie să fie existe o formă invizibilă de materie care să compenseze diferența, și a numit–o „masă lipsă". S-a admis că masa lipsă reprezintă o problemă, dar aceasta a rămas în suspensie timp de 40 de ani. Discrepanțe similare au început să apară și în galaxii ceva mai apropiate de noi. Studii privind mișcările stelelor din galaxia Andromeda au fost prezentate pentru prima dată în 1939 de astronomul american Horace Babcock. Deși discrepanțele erau evidente, Babcock a încercat să le explice cu ajutorul unei fizici convenționale. Studiile ulterioare ale „curbei de rotație" pentru Andromeda din anii 1960 duceau la o concluzie inevitabilă.

Cercetările fundamentale privind curbele de rotație ale galaxiilor spirale, inclusiv Andromeda, au fost publicate de astronomii americani Vera Rubin, Kent Ford și colaboratorii lor în anii 1970 și la începutul anilor 1980. Ei au prezentat rezultatele măsurătorilor detaliate ale mișcărilor stelelor pe orbite aflate la diferite distanțe de centrele galaxiilor. Ceea ce ei au descoperit pentru galaxii individuale era identic cu ceea Zwicky descoperise pentru roiul Coma: stelele de la marginea unei galaxii orbitează mult mai repede decât prezice estimarea masei galaxiei dedusă din stelele ei vizibile. Curba de rotație rămâne staționară odată cu creșterea distanței față de centrul galaxiei, în loc să scadă, așa cum e de așteptat. Figura 35 ilustrează acest comportament în cazul galaxiei Andromeda.

Aceste rezultate au fost întâmpinate cu scepticism, dar în cele din urmă au fost acceptate. De fapt, Peebles și Jeremiah Ostriker, colegul său de la Princeton, ajunseseră la concluzia că mișcările observate ale galaxiilor (inclusiv Calea Lactee) nu puteau fi modelate teoretic decât dacă se presupunea că fiecare galaxie posedă un imens halou de materie întunecată care–i dublează masa. În 1973, ei scriau: „[...] masele

halourilor Căii Lactee şi ale altor galaxii spirale din afara discurilor observate ar putea fi extrem de mari”.[86]

În anul următor ei arătau că masele galaxiilor s-ar putea să fi fost subestimate cu un factor de zece sau chiar mai mult. Materia lipsă o numim acum materie întunecată. Fiecare galaxie e învăluită într-un halou de materie întunecată, având o masă de 5–10 ori mai mare decât materia barionică. Aceasta e dovada despre care am vorbit în capitolul 2 (şi vă mulţumesc pentru răbdare).

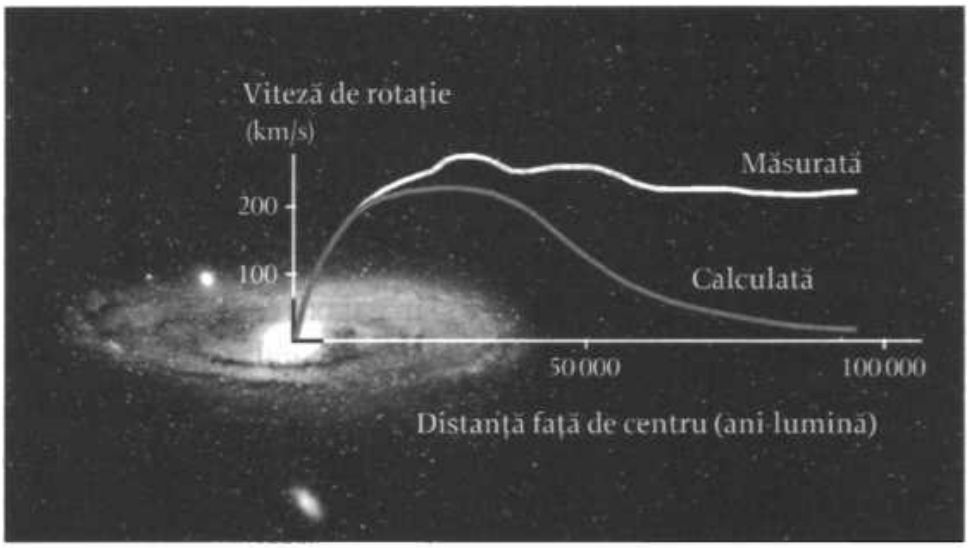


Figura 35. *Mecanica newtoniană prezice că stelele din galaxia Andromeda vor orbita centrul galactic cu viteze care cresc până la un maximum, iar apoi scad odată cu distanţa. Vitezele măsurate rămân însă la o valoare aproape constantă odată cu creşterea distanţei. Comportamentul măsurat e în acord cu prezenţa unui halou de materie întunecată în jurul galaxiei.*

Există şi alte dovezi pe care nu le vom prezenta aici în detaliu. Proprietăţile şi comportamentul roiului Glonţul din constelaţia Carena, format din două roiuri de galaxii care se ciocnesc, pot fi explicate doar prin acţiunea halourilor lor de materie întunecată. Un nor de materie întunecată poate juca rolul unei lentile, distorsionând şi deplasând imaginile galaxiilor din spatele lui. Acest tip de „lentilă gravitaţională” a fost folosit de misiunea Planck pentru a produce prima hartă a distribuţiei materiei întunecate din univers.

Există însă şi alte explicaţii. Au fost propuse modificări ale relativităţii generale pentru a explica masa „lipsă”, fără a apela la forme de materie

necunoscute.[87] Totuși, cântărind dovezile cosmologiei și astronomiei observaționale, candidatul cel mai convingător rămâne materia întunecată. Cel puțin deocamdată.

Orizontul cosmic al evenimentelor

Toate aceste statistici despre super–roiuri, filamente, ziduri, spații goale, distanțe și viteze conduc la două întrebări evidente. Cât de mare e universul? Și care e limita a ceea ce putem observa de pe Pământ sau de pe un satelit? Răspunsurile sunt destul de complicate. Am fi tentați să credem că, dacă universul are vârsta de 13,8 miliarde de ani, atunci limitele a ceea ce putem observa trebuie fixate la distanța pe care lumina o poate străbate în acest timp. Dar, încă o dată, această logică simplă nu ține cont de faptul că universul s-a extins în tot acest timp. Să presupunem că o explozie de lumină e emisă de o supernovă la câteva sute de milioane de ani după big bang sau, să zicem, acum 13,5 miliarde de ani. Luminii îi ia 13,5 miliarde de ani să ajungă la noi, ceea ce face ca supernova să se afle la o distanță de 13,5 miliarde de ani-lumină, și am fi tentați să credem că aceasta e limita orizontului nostru. Dar pe măsură ce lumina călătorește spre noi, spațiul–timp prin care se deplasează se extinde. Supernova care a emis lumina este de fapt și mai departe. Dacă luăm în considerare această expansiune, limita aparentă a orizontului nostru e împinsă până la aproximativ 46 miliarde de ani-lumină.

Apoi, dacă expansiunea ar fi încetinită, așa cum se credea odinioară, am ajunge în principiu să observăm tot mai multe galaxii. Însă, după cum vom vedea în capitolul următor, expansiunea este de fapt *accelerată,* ceea ce înseamnă că suntem limitați la un fel de orizont cosmic al evenimentelor și nu vom putea niciodată vedea ce se întâmplă dincolo de acest orizont, fiindcă obiectele care emit lumină se îndepărtează de noi mai repede decât poate acoperi lumina acest interval. Estimările actuale arată că orizontul cosmic al evenimentelor se află la o distanță de aproximativ 16 miliarde de ani-lumină.

În romanul lui Douglas Adams *Ghidul autostopistului galactic* se spune: „Spațiul este mare. Mare cu adevărat. Nici nu vă vine să credeți cât de năucitor de mare este. Adică, s-ar putea să vi se pară lung drumul până

la farmacie, dar ăsta nu înseamnă nici cât negru sub unghie pentru întreg spațiul”.[88]

Universul e într-adevăr mare și rămâi uluit până și de dimensiunile extraordinare ale structurilor locale din vecinătatea noastră cosmică. Am ajuns însă într-un punct din povestea noastră în care trebuie să ne concentrăm asupra unei mici regiuni situate la aproximativ 27.000 de ani-lumină de centrul unei banale galaxii de tipul SBc. În această regiune, câteva stele din Populația a II-a au ajuns la capătul vieții, sfârșind în explozii spectaculoase de supernove care au împrăștiat materia lor barionică saturată de elemente grele. Pe măsură ce norii de gaz și praf se adună din nou laolaltă, ia naștere un mediu pe care într-o bună zi îl vom numi *acasă*.

5. Sinteza

Originea complexității chimice

Universul intră acum într-o lungă perioadă de calm relativ. Activitatea intensă asociată cu apariția primelor stele a luat sfârșit la 600 de milioane de ani după big bang, deschizând calea unui proces mult mai liniștit, implicând stele mai mici din Populația a II-a, a căror viață se întinde pe *miliarde* de ani. Începe să prindă formă structura la scară mare a universului, distribuția super–roiurilor, filamentelor, zidurilor și spațiilor goale evoluând către tiparele pe care le vedem azi.[89] Expansiunea spațiului–timp e încetinită.

Trece un miliard de ani. Încă unul. Și încă unul. A venit momentul să privim ce se întâmplă în vecinătatea noastră cosmică. Galaxiile apar din halourile lor de materie întunecată, crescând în dimensiuni și formând ceea ce, din perspectiva noastră, vom numi roiuri și super–roiuri de galaxii. Tiparele evoluează continuu.

Să ne concentrăm atenția asupra unui mic grup de super–roiuri de galaxii dintr-o regiune a spațiului–timp întinsă pe o lungime de jumătate de miliard de ani-lumină. În centrul acestei regiuni se află ceea ce vom numi super–roiul Fecioarei, înconjurat de super–roiurile Hidra–Centaurul, Perseu–Peștii și Părul. Dincolo de spațiul gol al

Sculptorului se află super–roiul Sculptorului, parte a unui zid de galaxii întins pe un miliard de ani-lumină.

Super–roiul Fecioarei conține peste o sută de roiuri de galaxii și se întinde pe no milioane de ani-lumină. A fost identificat ca super–roi în 1958 de astronomul francez Gérard Henri de Vaucouleurs și confirmat ca atare prin studiile de deplasare spre roșu din anii 1970 și 1980. Are o masă de aproximativ 1015 $M_{\odot}$. Două treimi din galaxiile vizibile sunt conținute într-un disc eliptic subțire, iar restul formează un halou sferic.

Să privim mai în detaliu. În centrul super–roiului Fecioarei se află strălucitorul roi al Fecioarei, format dintr-un amestec de vreo 1500 de galaxii spirale și eliptice, conținând aproximativ o treime din galaxiile aparținând discului super–roiului. La periferia discului, la vreo 60 de milioane de ani-lumină de roiul Fecioarei, se află Grupul Local de galaxii, termen introdus de Edwin Hubble în 1936. Acesta a evoluat pentru a deveni un ansamblu modest de vreo 50 de galaxii, cu o masă de aproximativ $1,3x10^{12}$ $M_{\odot}$ și un diametru de 10 milioane de ani-lumină. Cea mai mare galaxie din Grupul Local este Andromeda, care conține aproximativ un bilion de stele. La circa 2,5 milioane de ani-lumină de Andromeda se află propria noastră galaxie Calea Lactee, a doua ca mărime din Grupul Local, însă ar putea conține mai multă materie întunecată decât Andromeda (fiind deci cel puțin la fel de masivă).

Calea Lactee

Calea Lactee a început să capete formă în urmă cu aproximativ 10 miliarde de ani, dar majoritatea stelelor ei sunt mult mai tinere. La fel ca toate celelalte galaxii, ea a apărut prin răcirea și condensarea materiei barionice captive într-un mare halou de materie întunecată. Figura 36 prezintă o serie de cadre din simularea pe calculator a formării unei galaxii cum e Calea Lactee. Se vede dar că galaxia nu apare pe de-a întregul formată, ci evoluează continuu pornind de la originile ei, cu câteva sute de milioane de ani după big bang.

În prezent, Calea Lactee e o galaxie spirală cu bare de tipul SBc, cu un disc subțire având o grosime de doar câteva mii de ani-lumină și un

diametru de 100.000–120.000 de ani-lumină. Cele mai multe dintre cele 100 până la 400 de miliarde de stele care se găsesc în acest disc (numărul de stele depinde de numărul total al stelelor pitice, care sunt greu de detectat) au o masă de aproximativ $6x10^{11}$ $M_{\odot}$. Stelele bătrâne se găsesc în afara discului, iar cele tinere ocupă un strat interior gros de doar 300 de ani-lumină.

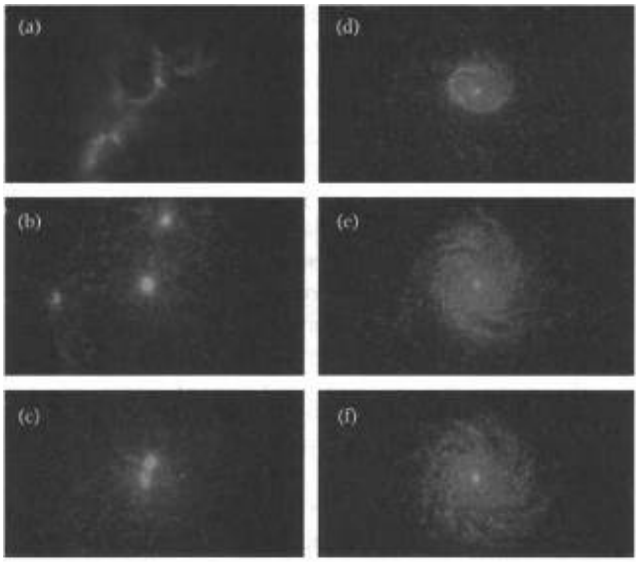


Figura 35. *Această simulare pe calculator a formării unei galaxii spirale de genul Căii Lactee prezintă acumularea treptată a materiei barionice (în principal hidrogen și heliu) în interiorul unui mare halou de materie întunecată (a), la aproximativ 500 de milioane de ani după big bang. Se formează numeroase protogalaxii care se rotesc, se ciocnesc și se contopesc, (b). După aproximativ 4 miliarde de ani, apare o unică galaxie, cu un centru bine definit, (c). Câteva miliarde de ani mai târziu, galaxia se ciocnește cu o alta, (d), formând o galaxie mai mare, care continuă să acumuleze gaz barionic și galaxii satelit mai mici din vecinătate, (e). Pe măsură ce ne apropiem de momentul actual, galaxia continuă să evolueze, (f). Aceste cadre sunt luate dintr-o simulare făcută pe Supercalculatorul Avansat de la NASA de Fabio Governato și colegii săi de la Universitatea din Washington.*

La aproximativ 3000 de ani-lumină deasupra și dedesubtul acest disc subțire, se găsește o altă structură, numită discul gros, care conține în jur de 10% din masa barionică aflată în companionul lui subțire. Discul gros ar putea fi rămășița unei alte galaxii mai mici, care s-a contopit cu proto–Calea Lactee. Sau ar putea să se fi format în urma unui „furt" gravitațional, Calea Lactee capturând stelele exterioare ale unei galaxii pitice din apropiere și lăsând–o doar cu miezul observabil azi al grupului globular gigantic (un ansamblu sferic de stele) Omega Centauri. Ambele scenarii sunt în acord cu vârstele observate ale stelelor din discul gros, în general stele din Populația a II-a mai bătrâne, cu metalicitate scăzută.

Pe măsură ce ne îndepărtăm de centru, întâlnim un halou galactic format din grupuri globulare și stele solitare cu metalicitate scăzută, încă și mai bătrâne. E un halou format din materie barionică vizibilă, aflat în interiorul unui halou mai mare de materie întunecată. Probabil că grupurile globulare cele mai îndepărtate de centru s-au format în cadrul unor galaxii pitice care s-au contopit apoi cu Calea Lactee. Grupurile interioare s-au format pesemne din nori gaz în primele stadii de evoluție ale galaxiei.

În afară de protuberanța centrală alungită, de formă eliptică, cele mai frapante structuri din discul subțire sunt cele două brațe spirale principale care se rotesc în sensul invers acelor de ceasornic în jurul centrului, brațele Scutum–Centaurus și Perseus reprezentate în figura 37. În această structură există și brațe interne minore, numite Norma și Sagittarius, și un braț extern minor, numit (fără prea multă imaginație) Brațul Extern. Alt braț minor, Orion, privit de pe Pământ, se află, desigur, în dreptul constelației Orionului. Nu este dar dacă e un braț independent al galaxiei sau o ramificație care leagă brațele Sagittarius și Perseus. Oricum ar fi, pare o străduță lăturalnică din centrul unui oraș galactic aglomerat, el însuși unul dintre miliardele de orașe foarte asemănătoare din univers.

Imaginați–vă un cerc cu raza de 27.000 de ani-lumină (în figura 37 apare ca un cerc punctat). Să ne îndreptăm atenția asupra unui grup de stele din Populația a II-a, mai mari și care îmbătrânesc deci mai repede, din apropierea acestui cerc. După ce mai așteptăm câteva miliarde de ani, stelele își consumă hidrogenul, se transformă în gigante roșii, își expulzează stratul extern și încep combustia heliului, apoi a carbonului, neonului, oxigenului și siliciului. Miezul stelelor colapsează, iar ele devin supernove, împrăștiindu–și materia în spațiul interstelar. Rămășițele acestor stele din Populația a II-a sunt bogate în elemente grele, iar pe noi ne interesează în special compoziția norului gigantic de gaz și praf care începe să se răcească și să se condenseze, gata să reia ciclul, căci acest nor va da naștere unei stele de generația a treia din Populația I, pe care o numim Soare.

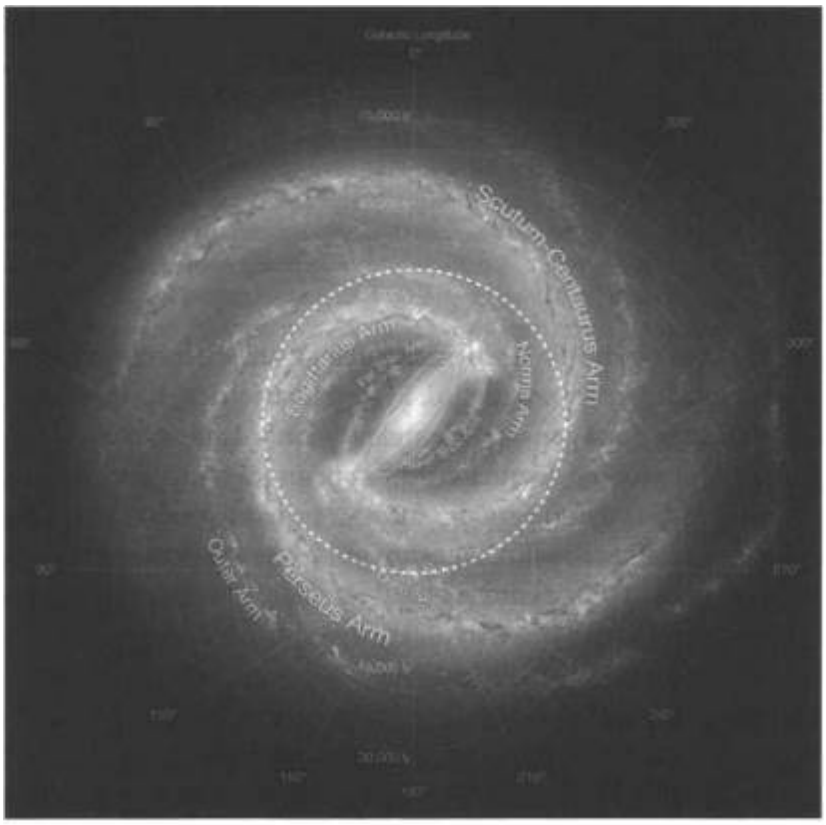


Figura 37. *Reprezentare a Căii Lactee privită de deasupra planului galactic, bazată pe datele obținute la lungimi de undă din domeniul radio, infraroșu și vizibil. Calea Lactee se consideră a fi o galaxie spirală cu bare, cu două brațe principale și câteva brațe secundare. Brațele principale sunt Scutum-Centaurus și Perseus. Cercul punctat are o rază de 27 000 de ani-lumină și trece prin brațul Orion, unde se află Soarele. Adaptat după Ed Churchwell, Brian L. Babler, Marilyn R. Meade, Barbara A. Whitney, Robert Benjamin, Remy Indebetouw* et al., Publications of the Astronomical Society of the Pacific, *121 (2009), p. 227.*

Elementele chimice

Ceea ce vom obține din norul molecular gigantic depinde, evident, de ce a intrat în compoziția lui. Materia barionică din nor a fost reciclată prin două generații de stele. La fondul atomilor de hidrogen și heliu produși de nucleosinteza primară s-au adăugat toate elementele din tabelul periodic, formate prin nucleosinteza stelară și exploziile supernovelor, iar acum pot fi create structuri moleculare complexe. Hidrogenul și heliul rămân în continuare elementele principale care intră în alcătuirea norului. Vecinii lor din tabelul periodic – litiul, borul și beriliul – au o abundență mult mai scăzută (cu 9–10 ordine de mărime), fiindcă nu sunt produși în cantități semnificative prin nucleosinteza primară sau prin cea stelară. Odată ce procesul triplu–alfa depășește

prăpastia din dreptul carbonului, se formează carbonul, azotul și oxigenul cu abundență relativă ridicată, după cum se vede în figura 38 (scara abundenței este logaritmică).

Deoarece ^{4}He este un element atât de important în nucleosinteza stelară, iar nucleele atomice cu numere pare de protoni și neutroni sunt foarte stabile, abundențele elementelor de la carbon la calciu prezintă un tipar în dinți de fierăstrău. Nucleul ^{12}C conține șase protoni și șase neutroni (sau trei nuclee ^{4}He). Adăugând un nucleu ^{4}He la ^{12}C în timpul combustiei heliului, obținem ^{16}O, care conține opt protoni și opt neutroni. Prin fuziunea a două nuclee ^{12}C în timpul combustiei carbonului și expulzarea unui nucleu ^{4}He, obținem ^{20}Ne, care conține zece protoni și zece neutroni. Adăugând un nucleu ^{4}He la nucleul ^{20}N în timpul combustiei carbonului, obținem ^{24}Mg, care conține doisprezece protoni și doisprezece neutroni. Ați înțeles ideea. Aceste elemente mai grele sunt toate multipli ai nucleelor ^{4}He folosite la producerea lor. Elementele cu numere impare de protoni și neutroni (precum ^{14}N, care are șapte protoni și șapte neutroni) se formează prin alte procese. Acest tipar oscilant continuă până la ^{40}Ca, care conține douăzeci de protoni și douăzeci de neutroni.

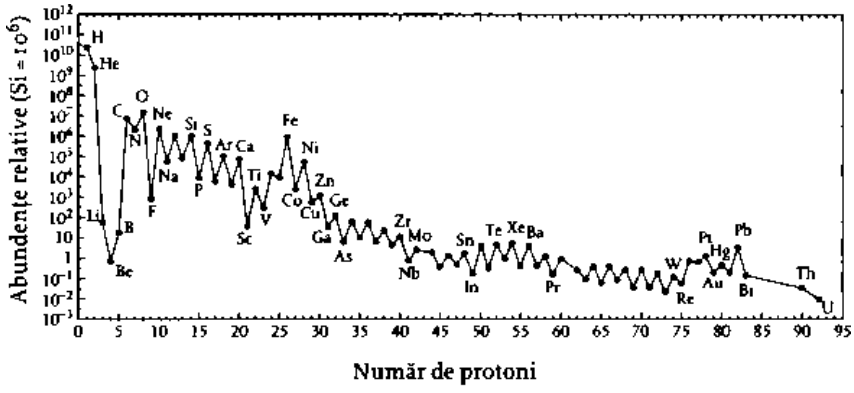


Figura 38. *Abundențele elementelor chimice produse prin nucleosinteza primară și prin cea stelară, ca număr de atomi pe milion raportat la siliciu. Aceste abundențe se referă la Soare, și există dovezi care sugerează că abundențele elementelor din norii de gaz molecular recent formați ar fi ușor diferite. Putem totuși presupune că în momentul în care norul era gata să dea naștere Soarelui, tiparul abundențelor nu diferea mult de cel prezentat aici. Atenție la scara* logaritmică *a abundenței.*

Procesul de construcție continuă prin combustia siliciului, cu adăugări succesive de ^{4}He la ^{28}Si, producând ^{32}S, ^{36}Ar, ^{40}Ca, ^{44}Ti, ^{48}Cr, ^{52}Fe și ^{56}Ni.

Elementele dincolo de ^{40}Ca sunt însă mai puțin stabile și pot suferi reacții prin intermediul forței slabe, iar tiparul oscilant al abundențelor dispare. În acest punct al tabelului periodic, stabilitatea nucleară favorizează un *surplus de* neutroni față de protoni. Cel mai stabil izotop al titaniului este ^{48}Ti. Izotopii nichelului ^{58}Ni și ^{62}Ni sunt mai stabili decât ^{56}Ni, care suferă rapid o dezintegrare prin forța slabă, transformându-se mai întâi în ^{56}Co, iar apoi în ^{56}Fe.

Punctul final al nucleosintezei stelare este ^{56}Fe. Fuziunea unui nucleu de ^{4}He cu ^{56}Fe costă mai multă energie decât se eliberează prin conversia masei conform relației $E = mc^2$ și, după cum am văzut în capitolul precedent, fierul se acumulează în miezul stelei până când aceasta explodează ca supernovă. Explozia dezmembrează elementele, rupând materia la loc în protoni și neutroni și reconstruind–o apoi, de data asta însă prin mecanismul bombardamentului cu neutroni rapizi.

Neutronii sunt particule neutre electric, deci nu întâmpină rezistență electrică atunci când izbesc un nucleu expus. Pe măsură ce neutronii se acumulează pentru a produce nuclee tot mai grele, unii suferă dezintegrări prin forța slabă, transformându-se în protoni. Apare astfel un șir de noi elemente și, deoarece producția de energie în acest proces nu mai e o condiție necesară (nu mai există o stea care să reziste gravitației), se formează elemente mai grele decât fierul. Acest proces de nucleosinteză prin bombardament cu neutroni se numește *procesul* r, unde „r” vine de la „rapid.”[90]

Abundențele relative ale elementelor grele de după fier scade însă abrupt, trăsătură pe care figura 38 n–o ilustrează bine, pentru că scara abundențelor relative e logaritmică. Nucleele cu număr par de protoni sunt în continuare favorizate, ceea ce generează oscilații, dar mecanismul prin care ele apar depinde acum de combinația dintre captura neutronilor și dezintegrarea prin forța slabă.

Astrochimia

Scenariul poveștii noastre a fost determinat de raporturile dintre cele patru forțe din natură. Gravitația a jucat un rol imens atât în evoluția universului până în acest punct, cât și în formarea stelelor și galaxiilor.

Forța nucleară tare a jucat un rol semnificativ în reacțiile de fuziune nucleară, aprinzând furnalele care ajută stelele să reziste forței gravitaționale. Forța nucleară slabă a avut un rol crucial, transformând cuarcii down în cuarci up și neutronii în protoni, și vice versa, permițând astfel elementelor grele să se acumuleze în interiorul stelelor și să se formeze în exploziile supernovelor. Și forța electromagnetică a jucat un rol important. Ea ține laolaltă protonii și electronii în atomii neutri și a fost deci responsabilă pentru recombinare, care a generat radiația cosmică de fond. Stelele și galaxiile nu s-ar fi putut forma fără procesul de răcire susținut de electromagnetism. Acestea fiind zise, există o subtilitate a electromagnetismului care n-a avut încă ocazia să se dezvăluie.

Însă chiar și aici, în mediul întunecat și rece al unui nor mare de gaz și praf, condițiile nu par promițătoare. Acesta e vidul spațiului interstelar. Densitățile de doar câteva sute de particule pe centimetru cub sunt mai mici decât în orice vid pe care putem spera să-l creăm vreodată într-un laborator de pe Pământ. Temperaturile nu diferă mult de cea a radiației cosmice de fond. Însă în acest punct intervine decisiv forța electromagnetică: intră în scenă chimia.

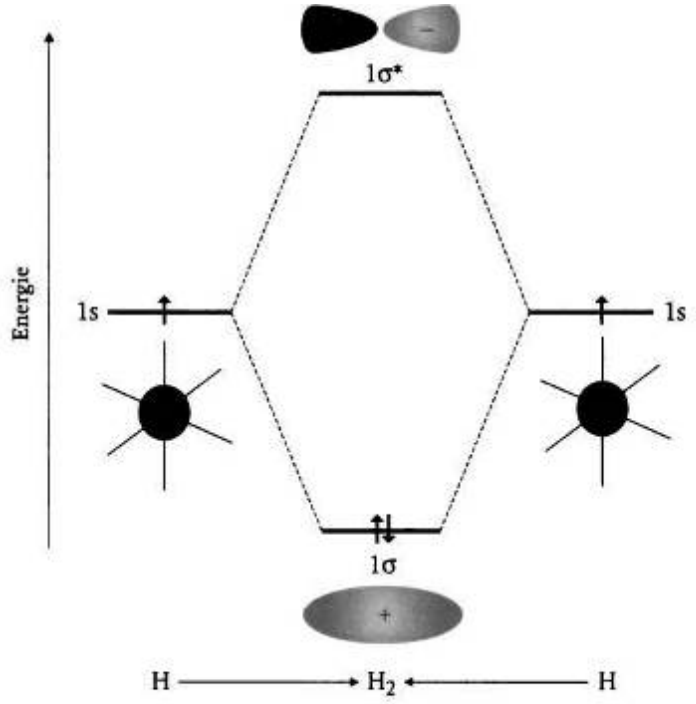


Figura 39. *Suprapunerea orbitalilor electronici 1s a doi atomi de hidrogen produce un orbital de legătură „constructiv" de energie joasă (1σ) şi un orbital de antilegtură „destructiv" (1σ*). Cei doi electroni pot acum ocupa orbitalul de legătură, cu condiţia ca spinii lor să fie împerecheaţi. Rezultatul e o moleculă de hidrogen în care cei doi electroni formează o singură legătură.*

De fapt, am menţionat deja rolul important jucat de hidrogenul molecular în răcirea gazului care a contribuit la formarea primelor stele. Într-adevăr, acolo unde există mulţi atomi de hidrogen şi electroni, iar condiţiile sunt favorabile, apar molecule de hidrogen. Să privim mai îndeaproape acest proces. Fiecare atom de hidrogen e alcătuit dintr-un proton central şi un electron care formează un tipar de undă staţionară în jurul nucleului (figura 39). Forţa electromagnetică dintre protonul încărcat pozitiv şi orbitalul electronic încărcat negativ e cea care–i ţine legaţi. Ceea ce se întâmpla când apropiem doi atomi de hidrogen e determinat de interacţiunea dintre orbitalii electronici. Acesta e domeniul electromagnetismului.

Figura 39 prezintă orbitalii 1s cu cea mai joasă energie şi nivelurile de energie asociate pentru doi atomi de hidrogen separaţi, unul în stânga, celălalt în dreapta. Când apropiem atomii, orbitalii electronici se combină. Pornim cu doi orbitali 1s, iar natura determină faptul că vom obţine doi noi orbitali. Ne putem gândi că unul descrie rezultatul unei suprapuneri *constructive* a celor doi orbitali 1s (asemănătoare cu

interferența constructivă a undelor care se suprapun), și celălalt rezultatul unei suprapuneri *destructive*. Suprapunerea constructivă a orbitalilor electronici produce un orbital molecular de energie joasă, numit *orbital de legătură.* Cei doi electroni, câte unul de la fiecare atom, sunt răspândiți deasupra celor doi atomi sub forma unui orbital care învăluie întreaga moleculă. Cantitatea cu care energia coboară sub energia atomilor separați se numește *energie de legătură* a moleculei și măsoară tăria legăturii chimice care se formează.

Mecanica cuantică cere ca doi electroni care împart același orbital să aibă orientări opuse ale spinilor, indicate în figura 39 prin săgeți (↑ semnifică „spinul în sus", iar ↓ „spinul în jos"). Spunem că spinii lor sunt *împerecheați.* Orbitalul de legătură se numește orbital sigma (σ). Orbitalul produs prin combinația „destructivă" a celor doi orbitali 1s este un orbital de *antilegătură,* cu o energie înaltă, numit σ* („sigma steluță").

Odată populați orbitalii moleculari cu electronii disponibili (împerecheați), putem determina *ordinul legăturii* scăzând din numărul electronilor din orbitalii de legătură numărul celor din orbitalii de antilegătură, și împărțind la doi. Aplicând formula la hidrogenul molecular din figura 39, obținem: doi minus zero împărțit la doi, deci ordinul legăturii e unu. Între cei doi atomi se formează o singură legătură.[91]

Figura 39 prezintă formarea orbitalilor moleculari din doi orbitali atomici 1s, dar ce se întâmplă cu orbitalii de energii mai înalte 2s, 2p etc.? Doar orbitalii cu energii similare pot participa la aceste jocuri moleculare, așa încât se stabilește o ierarhie. La orbitalii moleculari 1σ și 1σ* putem adăuga orbitalii 2σ și 2σ*, de energie mai înaltă, formați prin combinarea orbitalilor 2s. Orbitalii de energie și mai înaltă 2pσ și 2pσ* se formează prin suprapunerea celor doi orbitali 2p dispuși de-a lungul axei legăturii H–H, apoi orbitalii 2pπ și 2pπ* se formează din orbitalii 2p perpendiculari pe această axă.[92] Pentru simplitate, în figura 39 nu am inclus acești orbitali și nivelurile lor de energie.

Hidrogenul molecular e doar începutul. Rămânem uimiți de complexitatea pe care natura o poate crea combinând protoni și neutroni pentru a produce seria de 92 de elemente chimice, dar

complexitatea creată prin combinarea orbitalilor electronici ai acestor elemente pentru a forma molecule e încă mai impresionantă.

Moleculele interstelare

Au fost detectate deocamdată în norii moleculari interstelari peste 200 de molecule, de la molecule diatomice simple, cum sunt cele de hidrogen (H_2), monoxid de carbon (CO), azot molecular (N_2), oxigen molecular (O_2) și clorură de sodiu (NaCl), până la hidrocarburi aromatice policiclice, cum ar fi antracen ($C_{14}H_{10}$), piren ($C_{16}H_{10}$) și formele alotrope de carbon buckminster–fulerenă (C_{60}) și 70–fulerenă (C_{70}). Alte exemple sunt date în tabelul 2.[93]

Cine a studiat, fie și superficial, chimia organică – în esență, chimia compușilor carbonului – va fi uimit de gama moleculelor din tabel. Ceea ce face posibilă această diversitate de molecule organice, dintre care multe sunt asociate cu viața, este existența unor „grupe funcționale”, ansambluri de atomi care determină natura structurii moleculelor și reacțiile chimice pe care le vor suferi. Acestea includ grupele hidroxil (–OH), carbonil (–CO), amino ($–NH_2$), aldehidă (–CHO), hidroperoxil ($–O_2H$), carboxil (CO_2H) și altele. În listă apar și hidrocarburi alifatice, molecule constând din atomi de carbon dispuși în lanțuri (cum ar fi ethilena, $H_2C=CH_2$, și propilena, $H_2C=CHCH_3$, unde „=” însemnă legătură

Tabelul 2. Exemple de molecule

Număr de atomi	Exemple
2	hidrogen molecular (H_2), monoxid de carbon (CO), azot molecular (N_2), oxigen molecular (O_2), clorură de sodiu (NaCl), oxid de fier (FeO), acid clorhidric (HCl), fluorură de hidrogen (HF), carborund (SiC), oxid de titan (TiO)
3	dioxid de carbon (CO_2), apă (H_2O), hidrogen sulfurat (H_2S), acid cianhidric (HCN), cianură de potasiu (KCN), protoxid

	de azot (N_2O), hidroxid de sodiu (NaOH), ozon (O_3), dioxid de sulf (SO_2), dioxid de titaniu (TiO_2)
4	acetilenă (C_2H_2), formaldehidă (H_2CO), peroxid de hidrogen (H_2O_2), amoniac (NH_3, acid izocianic (HNCO)
5	metan (CH_4), cetonă (H_2C_2O), cianoacetilenă (HE_3N), acid formic (HEO2H), ion de amoniu (NH_4^+)
6	etilenă (C_2H_4), acetonitril (CH_3CN), metanol (CH_3OH)
7	metilamină (CH_3NH_2), acrilonitril (CH_2CHCN), oxid de etilenă ($c–C_2H_4O$)[94], alcool vinilic (CH_2CHOH), acetaldehidă (CH_3CHO)
8	acid acetic (CH_3CO_2H), glicoaldehidă (CH_2OHCHO), metilcianoacetilenă (CH_3C_3N)
9	dimetileter (CH_3OCH_3), alcool etilic (C_2H_5OH), propilen (CH_3CHCH_2)
10	acetonă ($(CHb)_2CO$), glicină ($NH_2CH_2CO_2H$), etilenglicol ($(CH_2OH)_2$)
> 10	acetat de metil ($CH_3CO_2CH_3$), benzen (C_6H_6), ciano–pentaacetilenă ($HC_{11}N$), antracen ($C_{14}H_{10}$), piren ($C_{16}H_{10}$), buckminsterfulerenă (C_{60}), 70–fulerenă (C_{70})

Dublă[95] și hidrocarburi aromatice, în care atomii de carbon sunt dispuși în formă de inel (benzen, antracen, piren și fulerenele).

Și, desigur, tabelul include și glicina ($NH_2CH_2CO_2H$), cel mai simplu dintre cei 20 de aminoacizi, care conține grupele amino și carboxil, codate de informația genetică și importante în construcția proteinelor. Ne vom întâlni cu glicina și în capitolul 8. Statutul ei de moleculă interstelară a fost viu discutat. În 2009 a fost detectată în cantități foarte mici în coada cometei Wild 2 de către misiunea NASA Stardust,

dar prezența ei în atmosfera subțire a cometei 67P/Cheryumov–Gerasimenko, raportată în septembrie 2016 de misiunea Rosetta a Agenției Spațiale Europene, pare certă.

Orbitalii hibrizi și perechile singuratice

Proprietățile grupelor funcționale derivă din natura atomilor care le compun, dar reactivitatea le este determinată în mare măsură de *formele* lor. La prima vedere, geometria moleculelor – lungimile legăturilor chimice și unghiurile dintre ele – pare să nu conteze. Vom vedea însă în capitolul 8 că geometria moleculară joacă un rol esențial în chimia vieții. Nu e surprinzător faptul că formele moleculelor sunt modelate de distribuția spațială a orbitalilor moleculari. Aceasta e o manifestare foarte subtilă a forței electromagnetice (deși, probabil, nu cea mai subtilă, după cum vom vedea). În descrierea pe care am făcut-o orbitalilor moleculari ai hidrogenului am spus că doar orbitalii electronici de energie apropiată se pot combina. Nu vedem, de exemplu, orbitali 1s și 2s combinându-se, deoarece energiile lor sunt prea diferite, dar în condiții favorabile, combinarea diverșilor orbitali seamănă cu combinarea diverselor forme de undă.

Chimistul american Linus Pauling a fost primul care a arătat că formele unor molecule simple sunt determinate de felul în care se amestecă orbitalii electronici ai atomilor constituenți. De pildă, metanul (CH_4) are o formă caracteristică de tetraedru, cu unghiurile dintre cele patru legături C–H identice (unghiurile legăturii H–C–H) de 109,5°. Atomul central de carbon contribuie cu șase electroni. Doi dintre aceștia (cu spinul împerecheat) stau deoparte în orbitalul atomic 1s cu energia cea mai joasă și nu participă la legături. Alți doi se află în orbitalul 2s, iar ultimii doi se află în fiecare dintre cei doi orbitali 2p, lăsând un al treilea orbital 2p vacant. Trebuie să suprapunem acești orbitali cu patru orbitali 1s, câte unul de la fiecare atom de hidrogen. Oricât am încerca, nu putem obține o formă de tetraedru din această combinație. Orbitalul 2s e sferic – nu favorizează o anumită direcție. Cei trei orbitali 2p sunt orientați de-a lungul celor trei axe carteziene (x, p, z), de unde rezultă unghiuri de legătură de 90° (figura 40(a)). Ceva nu e în regulă. Pauling și-a dat seama că orbitalii 2s și 2p ai carbonului au energii apropiate, deci se pot combina. Dacă mutăm un electron de pe orbitalul 2s pe

orbitalul 2p vacant, iar apoi amestecăm toți cei patru orbitali, orbitalii *hibrizi* rezultați vor fi pe sfert s și pe trei sferturi p. Aceștia se numesc orbitali hibrizi sp^3 (se pronunță „s–p–trei”). Dar ce formă au orbitalii hibrizi sp^3? Ați ghicit. Lobii lor principali sunt orientați către cele patru vârfuri ale tetraedrului (figura 40(b) și (c)). Nu ne rămâne decât să suprapunem câte un orbital 1s al hidrogenului pe lobul fiecărui orbital hibrid sp^3, creând patru orbitali moleculari σ identici care corespund celor patru legături carbon–hidrogen. Forma hibrizilor sp^3 ai carbonului e preluată de forma orbitalilor moleculari rezultați, astfel încât molecula are o geometrie tetraedrică.

Geometria moleculară ține de legături chimice și de unghiuri, dar depinde de geometria orbitalilor moleculari, dintre care unii pot să nu fie implicați direct în formarea legăturilor. Se știe că molecula de amoniac (NH_3) are formă piramidală. Dacă îndepărtăm atomul de hidrogen din vârful moleculei tetraedrice de metan din figura 40(c), rămânem cu o geometrie piramidală pentru grupul CH_3, exact felul în care trebuie să ne închipuim structura moleculei de NH_3.

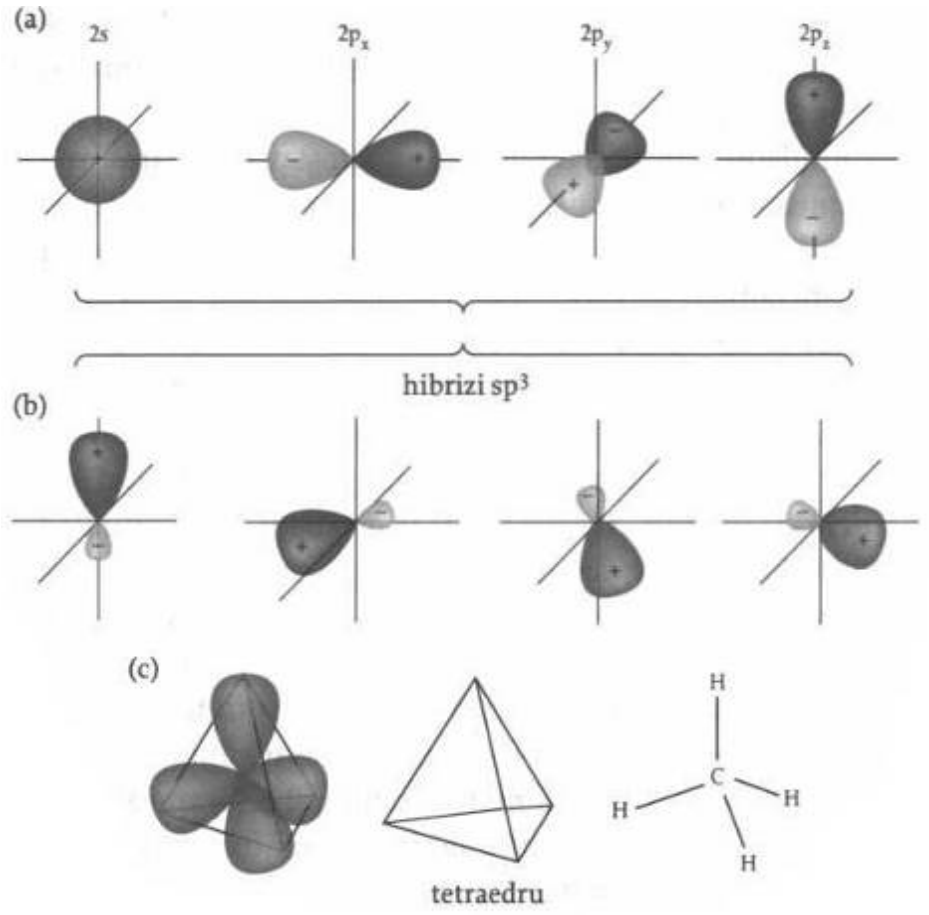


Figura 40. *Atomul central de carbon din metan are doi electroni pe orbitalul 2s şi doi electroni pe câte doi orbitali 2p, iar al treilea orbital 2p rămâne vacant. Dar dacă unul dintre electronii 2s este mutat pe orbitalul vacant 2p, toţi cei patru orbitali se pot amesteca, (a). Rezultatul este patru orbitali hibrizi sp^3, (b), care dau naştere unei forme de tetraedru, (c).*

Azotul are şapte electroni. La fel ca în cazul carbonului, doi dintre ei sunt „îngropaţi" în orbitalul 1s al azotului, lăsând cinci electroni să participe la legături, doi în orbitalul 2s, şi câte unul în fiecare orbital 2p. După cum ştim, nu putem obţine o formă piramidală folosind trei orbitali 2p, deci se formează patru orbitali hibrizi sp^3 identici amestecând orbitalii 2s şi 2p. De data asta însă există o distribuţie inegală a electronilor. Trei orbitali hibrizi conţinând câte un singur electron se suprapun cu un orbital 1s al hidrogenului, dar al patrulea orbital hibrid este deja „ocupat" cu doi electroni cu spinii împerecheaţi. Această „pereche singuratică" de electroni este orientată într-o direcţie spaţială determinată de forma orbitalului pe care îl ocupă. Forma generală a moleculei de amoniac este deci tetraedrică, la fel ca a

metanului, dar una dintre legături e înlocuită de o pereche singuratică de electroni, atomii rămaşi dând forma piramidală.[96]

În tabelul periodic, după carbon şi azot urmează oxigenul, şi am fi tentaţi să-i aplicăm aceeaşi schemă. Oxigenul are opt electroni, doi îngropaţi în orbitalul 1s, doi ocupă orbitalul 2s, iar patru sunt distribuiţi în cei trei orbitali 2p. Prin amestecul orbitalilor 2s şi 2p pentru a forma patru orbitali hibrizi sp^3, am prezice apariţia a două perechi de electroni singuratici orientate în sus, ca nişte urechi de iepure, lăsând cei doi orbitali hibrizi ocupaţi de câte un singur electron să se suprapună cu orbitalii 1s ai hidrogenului pentru a forma molecula de apă (H_2O), cu o geometrie căreia i se spune, fără prea multă imaginaţie, „îndoită". Din păcate, această descriere e simplistă. Calcule cuantice complicate nu prezic „urechile de iepure", şi pare mai probabilă o altă descriere, bazată pe trei hibrizi sp2 şi o pereche de electroni ocupând orbitalul 2p neimplicat, ceea ce înseamnă că cele două perechi de electroni singuratici nu sunt echivalente: una e prezentă într-un orbital 2p rămas deoparte, iar cealaltă e conţinută în unul dintre hibrizii sp2. Iepurele are urechile strâmbe.

Rezultatul este că interacţiunile subtile dintre orbitalii electronici ai diverşilor atomi generează o impresionantă varietate de molecule cu diferite forme şi tipare de reactivitate. Când înconjoară un nucleu central, umilul electron se dovedeşte a fi o particulă elementară extraordinar de versatilă, iar de la relativa simplitate a structurilor atomice construite din protoni, neutroni şi electroni se ajunge la minunata complexitate a structurilor chimice construite din orbitali moleculari. Însă moleculele sunt delicate şi sunt lesne descompuse (sau „fotodisociate") de lumina ultravioletă a stelelor învecinate. Într-o anumită măsură, moleculele din interiorul unui nor sunt protejate împotriva acestei radiaţii de moleculele de hidrogen de la margini, care absorb lumina cu lungimi de undă distructive, împiedicând–o să pătrundă în centrul norului. Moleculele sunt protejate şi de granulele de praf din nor, iar pentru că aceste granule joacă un rol important în sinteza chimică, e momentul să le privim mai îndeaproape.

Praf de stele

Știm bine ce e praful. Praful din gospodărie ne dă zilnic bătăi de cap, obligându–ne să folosim periodic produse de curățat. Praful casnic însă e compus din resturi de materie vie: celule epiteliale, păr uman și animal, polen amestecat cu particule anorganice din mediu, cum ar fi minerale din sol, fibre textile și celuloză. Acest praf oferă o nișă ecologică în care prosperă acarienii, „păienjeni" microscopici care se hrănesc cu celule epiteliale moarte. Particulele de praf din acest amestec amorf au dimensiuni care variază între câteva zeci de microni (un micron reprezintă o milionime dintr-un metru) și o mie de microni sau mai mult. Evident, nu acest gen de praf întâlnim în spațiul interstelar.

Mare parte din praful stelar e generată de gigantele roșii, stele ajunse la un stadiu în evoluția lor în care au părăsit șirul principal (figura 27). Carbonul, oxigenul și siliciul produse în miezurile lor sunt trase la suprafață de curenții de convecție, iar acolo încep să se răcească și să se coaguleze, formând mici particule. Tipul de particule rezultate depinde de istoria evolutivă a stelei. O gigantă roșie bogată în carbon poate produce particule de grafit de o sutime de micron, mai curând fum decât praf. Stelele bogate în oxigen pot produce grăunțe de silicați, compuși chimici alcătuiți din siliciu, oxigen și elemente mai grele, cum sunt fierul sau magneziul, cu dimensiunea de până la un micron. De exemplu, olivina (numită astfel pentru culoarea ei verde–oliv) e un amestec de silicat de magneziu (Mg_2SiO_4) și silicat de fier (Fe_2SiO_4). Olivină bogată în magneziu a fost găsită în meteoriți, în coada cometei Wild 2 și în miezul cometei Tempel 1. A fost de asemenea observată în praful din jurul stelelor tinere. Alte tipuri de particule de praf stelar identificate până în prezent sunt diamantul, carbura de siliciu (SiC), carbura de titan (TiC), dioxidul de titan (TiO_2), nitrura de siliciu (Si_3N_4), corindonul (Al_2Op, spinelul ($MgAl_2O_4$), hibonitul (un oxid compus din calciu, ceriu, aluminiu, titan și magneziu) și un alt silicat numit piroxen (compus dintr-o gamă largă de molecule conținând calciu, magneziu, fier și multe alte elemente grele). Toate aceste particule sunt rețele extinse de atomi sau molecule formând o structură regulată, în care descifrăm o altă manifestare subtilă a forței electromagnetice.

Desprinse din straturile externe ale gigantelor roșii datorită presiunii radiației și ejectate violent în exploziile supernovelor, particulele plutesc în mediul interstelar, oferind suprafețe pe care să se alipească atomii altor elemente – hidrogen, carbon, azot, oxigen sau sulf, de pildă.[97] Aceste elemente reacționează pe suprafețele particulelor care, în timp, se acoperă cu gheață, dioxid de carbon, amoniac sau metan solide. Pe suprafețele lor se pot depune și alte molecule, cum ar fi monoxidul de carbon și hidrogenul sulfurat.

Este de ajuns acum să scăldăm aceste particule în lumina ultravioletă a stelelor din vecinătate pentru a obține un număr impresionant de mici combinate chimice. Așa cum norii alcătuiți din vaporii de apă din atmosferă obturează razele Soarelui, stricându–ne vacanța la mare, la fel și norii moleculari obturează lumina stelelor îndepărtate. Norul molecular Barnard 68 din constelația Ophiuchus, aflat la doar 500 de ani-lumină de noi și identificat în 1919 de astronomul american Edward Emerson Barnard, este doar unul dintr-un lanț de asemenea „globule", sugerând că a făcut parte cândva dintr-un nor molecular mai mare care s-a dispersat. Barnard 68 are o masă de aproximativ 3 $M_{\odot}$ și un diametru de o jumătate de an-lumină. Temperatura în miezul norului este de aproximativ 8K, la margine ajungând la 16K, iar densitatea particulelor e cuprinsă în intervalul 0,9–43x10^5 particule pe centimetru cub.[98] Figura 41 prezintă o imagine a norului produsă în 1999 de Observatorul Sudic European, colaborarea a 15 state europene care folosesc observatoare terestre din Chile. După cum se vede, lumina stelelor din fundal e drastic obturată de particulele de praf din nor. Faptul că dimensiunile norului sunt atât de bine definite sugerează că este pe punctul de a colapsa, pentru a produce una sau mai multe stele, în aproximativ 100.000 de ani.

„Suntem praf de stele" cânta Joni Mitchell la festivalul Big Sur din California în septembrie 1969.

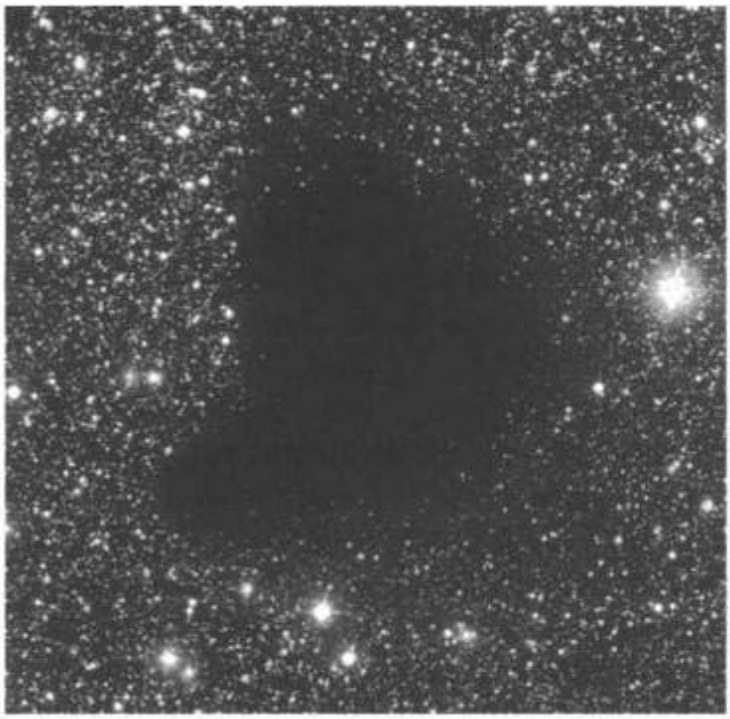


Figura 11. *Barnard 68 este un nor molecular din constelația Ophiuchus, cu masa de aproximativ 3 $M_\odot$ și diametrul de o jumătate de an-lumină. Aceasta e o imagine compusă (lumină vizibilă și infraroșu apropiat) obținută în 1999, arătând că lumina stelelor îndepărtate din Calea Lactee e complet obturată de particulele de praf din nor.*

„Suntem aurii. Și trebuie să ne întoarcem în grădină."[99] Mitchell a scris acest cântec ca imn pentru festivalul Woodstock, care avusese loc cu o lună în urmă, dar la care n-a participat. Versurile se bazau pe ceea ce îi spusese prietenul ei Graham Nash. Piesa a devenit apoi un hit al grupului de rock–folk Crosby, Stills, Nash & Young. Indiferent ce credeți despre mișcarea culturală de la sfârșitul anilor 1960, acestea sunt cuvinte profetice. Desigur, oamenii sunt mult mai mult decât o simplă adunătură de atomi și molecule, dar aceasta e materia din care suntem alcătuiți, iar fiecare atom din „hardware-ul" nostru muritor, mai greu decât cel de hidrogen, a fost forjat în interiorul unei stele sau în explozia unei supernove, fiind apoi azvârlit în spațiul interstelar pentru a forma un nor molecular gigantic.

Norul molecular gigantic

Să dăm puțin timpul înapoi și să ne concentrăm atenția asupra unui anumit nor molecular gigantic. Are dimensiunea de aproximativ 65 de

ani-lumină şi masa de 1000 $M_{\odot}$, rotindu-se în jurul centrului Căii Lactee la distanţa de 27.000 de ani-lumină şi efectuând o rotaţie completă în 220–250 milioane de ani (figura 37). Conţine o mare diversitate de elemente chimice, cu abundenţe relative asemănătoare (dar nu neapărat identice) celor din figura 38. Conţine o gamă largă de molecule, în tabelul 2 numărându-se doar o mică parte dintre ele, iar densitatea medie este de câteva sute de molecule pe centimetru cub. Temperaturile din interiorul norului sunt puţin mai ridicate decât temperatura radiaţiei cosmice de fond. Norul conţine de asemenea particule de praf, granule de grafit acoperite cu gheaţă şi silicaţi, ceea ce reprezintă sub 1% din masa totală a norului, dar oferă o protecţie importantă împotriva radiaţiilor ultraviolete distructive şi acţionează ca mici combinate chimice.

Iar acum trebuie să aşteptăm, fiindcă perioada de gestaţie e îndelungată. Primele stele s-au născut probabil la câteva sute de milioane de ani după big bang. Stelele din Populaţia a II-a au urmat curând, însă erau mai mici şi mai stabile, rămânând vreme de miliarde de ani în şirul principal. Moartea stelelor din Populaţia a II-a în vecinătatea Căii Lactee a dus la crearea acestui nor molecular gigantic, şi trebuie să aşteptăm răbdători ca norul să sucombe din nou sub acţiunea gravitaţiei. Universul se apropie de vârsta de 9 miliarde de ani.

În timp ce norul începe să colapseze, în univers are loc un alt eveniment important. Pe măsura trecerii anilor, expansiunea spaţiului–timp a fost treptat frânată, pierzând bătălia cu întreaga materie din univers. S-a ajuns într-un punct critic. Materia e suficient de diluată pentru ca efectele energiei întunecate, energia nevăzută a vidului spaţiului–timp, să se dezvăluie în sfârşit Aceasta e energia întunecată rămasă probabil în urma inflaţiei cosmice. N-a dispărut niciodată, mereu a accelerat uşor expansiunea spaţiului–timp, dar efectele ei au trecut până acum neobservate.

Universul în accelerare şi reapariţia constantei cosmologice

După cum am văzut în capitolul 1, Einstein a introdus constanta cosmologică în ecuaţiile câmpului gravitaţional pentru univers fiindcă s-a gândit că rezultatul ar trebui să fie static. Deşi alţii – Lemaître, de pildă – au susţinut ideea de univers în expansiune, abia observaţiile

astronomice ale lui Hubble și Humason l-au făcut pe Einstein să–și abandoneze „factorul născocit” la începutul anilor 1930. Dar rămânea o problemă. Se știa că nu se poate obține un spațiu–timp plat decât dacă există un echilibru fin între expansiunea spațiului–timp și cantitatea de masă–energie din el. Acest echilibru e reflectat într-un parametru de densitate, numit omega (Ω), reprezentând raportul dintre densitatea de masă–energie și valoarea critică necesară obținerii unui univers plat. Un univers închis are Ω mai mare decât 1, un univers deschis are Ω mai mic decât 1, iar un univers plat Ω egal cu 1.

Chiar dacă acceptăm că inflația cosmică rezolva în principiu problema planeității și a orizontului, rămânea problema cantității totale de masă–energie din univers. Simplu spus, era prea mică. Nici măcar materia întunecată nu era de ajuns. La începutul anilor 1990, cea mai bună estimare pentru Ω, bazată pe masa observată a universului, era de 0,3. Voi nota această contribuție cu Ωm, unde indicele M reprezintă „masa” atât a materiei barionice, cât și a celei întunecate. Dacă asta ar fi tot ce există (dacă $\Omega = \Omega_M$), atunci universul ar trebui să fie deschis. Fără o masă suficientă pentru a opri expansiunea, universul ar fi sortit să se extindă pe veci, iar spațiul–timp ar avea o curbură negativă.

Unii astrofizicieni au început să spună că acel factor născocit de Einstein și-ar putea până la urmă găsi locul în ecuațiile universului. Ei își dădeau seama că o densitate a masei de 0,3 și o constantă cosmologică reprezentând densitatea de energie întunecată (pe care o voi nota cu Ω_Λ) de 0,7 ar putea fi singura soluție pentru ca Ω (dat acum de $\Omega_M + \Omega_\Lambda$) să fie fi egal cu 1.

Valoarea lui Ω determină evoluția viitoare a universului, după cum e ilustrat în figura 42 pentru câteva modele de tip Friedmann. Într-un univers în expansiune fără masă ($\Omega_M=0$), nimic nu poate schimba rata inițială de expansiune de la big bang, așa încât distanța medie dintre două puncte din spațiu (unde s-ar afla galaxiile, dacă ele ar exista) crește liniar cu timpul scurs de la big bang. Dacă materia (inclusiv materia întunecată) este tot ce există, atunci $\Omega_M = 0,3$ și avem mici abateri de la comportamentul liniar, materia acționând ca o ușoară frână asupra ratei de expansiune în următoarele 15 miliarde de ani. Dacă credem însă că am scăpat ceva din vedere și în univers există mult

mai multă materie decât am putut deocamdată identifica, atunci am putea pune $\Omega_M = 1$. Pedala de frână e apăsată mai tare. În schimb, într-un univers cu $\Omega_M = 0,3$ și $\Omega_\Lambda = 0,7$ obținem pentru viitor o curbă care crește mai repede. Energia întunecată învinge efectele de frânare ale materiei și începe din nou să accelereze expansiunea.

Desigur, nu putem vedea în viitor, dar observați că aceste scenarii prezic *istorii* diferite ale expansiunii universului. Considerând $\Omega_M = 0,3$ și $\Omega_M = 1$, universul ar trebui să fie mai tânăr decât „vârsta Hubble", obținută prin simpla extrapolare liniară din prezent spre trecut. Pentru $\Omega_M = 0,3$ și $\Omega_\Lambda = 0,7$ vârsta universului e în acord cu cea estimată în prezent, dar observați că distanța medie dintre galaxii (deci și dimensiunea totală a universului) din trecutul îndepărtat e *mai mare* în acest scenariu decât prezice simpla extrapolare liniară înapoi în timp.

La ce ne ajută toate astea? Suntem tentați să spunem că, după cum nu putem vedea în viitor, nu putem vedea nici în trecut, dar nu–i așa. Lumina provenită de la obiecte îndepărtate ne arată cum se comportau aceste obiecte în momentul emiterii luminii. De exemplu, lumina Soarelui ne spune cum arăta Soarele în urmă cu vreo opt minute, timpul în care lumina parcurge 150 de milioane de kilometri pentru a ajunge pe Pământ. Lumina provenind din galaxia Andromeda ne spune cum arăta aceasta în urmă cu 2,5 milioane de ani. Este un efect „retrospectiv".[100] Dacă am putea privi galaxiile care au emis lumină cu 5, 10 sau chiar 13 miliarde de ani în urmă, am putea reconstitui istoria expansiunii universului. Cele mai îndepărtate galaxii sunt însă și cele mai palide, ceea ce face foarte dificilă măsurarea distanțelor (pentru a ne da o măsură a distanței medii) și a deplasării spre roșu (pentru a ne da o măsură a vârstei lor). Soluția ar fi ca stelele din aceste galaxii să devină supernove.

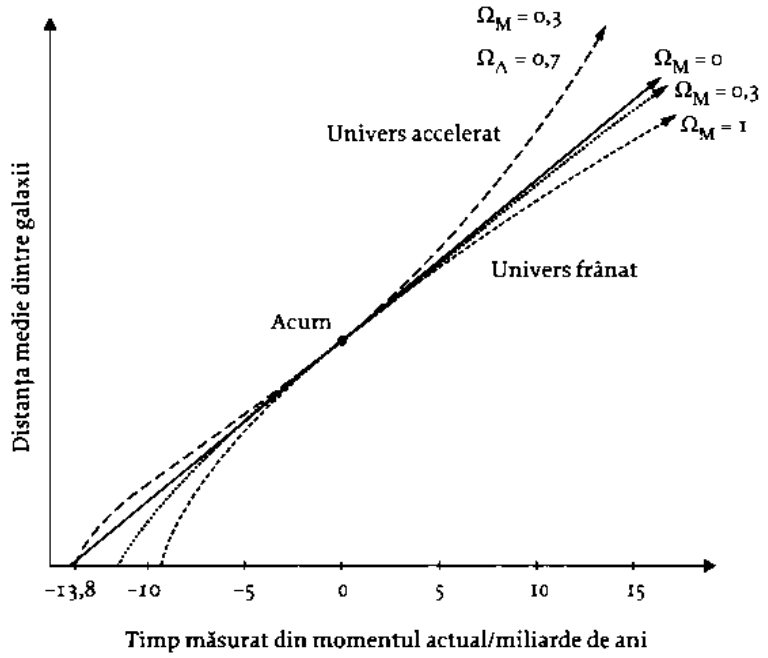


Figura 42. *Evoluția viitoare a universului depinde de parametrul de densitiate Ω, care ar putea conține contribuții ale densității de materie (Ω_M) și ale densității energiei întunecate (Ω_Λ).*

Astronomii clasifică supernovele pe baza diferitelor elemente chimice observate în spectrele lor. Supernovele implicând stele care și-au consumat hidrogenul sunt de Tipul I. Ele nu prezintă linii spectrale care pot fi atribuite atomilor de hidrogen. Tipul I de supernove e împărțit în subcategorii, în funcție de prezența liniilor spectrale a altor atomi sau ioni. Tipul Ia prezintă o linie spectrală intensă datorită siliciului ionizat.

Aceasta nu e amprenta unei supernove al cărei nucleu colapsează, ci a unei supernove rezultând dintr-un proces termic violent într-un sistem binar de stele, în care două stele sunt legate gravitațional. Una dintre stele ajunge la faza de gigantă roșie, dar ce rămâne din ea nu e suficient de masiv pentru a declanșa combustia carbonului. După cum am văzut în capitolul precedent, rezultatul e o pitică albă cu un nucleu din carbon și oxigen. Această pitică are însă un companion. Când a doua stea ajunge la faza de gigantă roșie, pitica albă poate atrage materie din straturile exterioare ale celeilalte, reconstruindu-se. Când masa piticei depășește 1,4 $M_\odot$, în miezul ei se declanșează combustia carbonului. E prea mult pentru sărmana pitică. Energia din combustia carbonului este eliberată prea rapid, iar steaua renăscută e sfâșiată. Unda de șoc rezultată poate atinge viteze de până la 20.000 km/s.

Acesta e un scenariu cu consecinţe clare. Pitica albă are o compoziţie chimică lesne predictibilă şi nu poate deveni supernovă dacă nu acumulează o masă suficientă (şi precis determinată) care s–o ducă peste pragul combustiei carbonului. Prin urmare, intensitatea luminii emise în explozie scade (şi de regulă se anulează în câteva zile) într-o manieră complet predictibilă. Supernovele de Tipul 1a servesc drept „lumânări standard" secundare.

Găsirea unei supernove de Tipul Ia şi determinarea maximumului strălucirii dau o măsură a distanţei la care se află galaxia gazdă („distanţa dată de luminozitate"). Măsurătorile liniilor spectrale pot fi folosite pentru a determina deplasarea spre roşu, deci aşa–numitul factor de scară cosmică – o măsură a dimensiunii relative a universului – la momentul emisiei luminii.[101]

Pentru a înţelege implicaţiile acestor măsurători cosmologice trebuie să analizăm diferitele curbe din figura 42. Legea lui Hubble se aplică unui univers cu rata de expansiune constantă de-a lungul istoriei sale – linia dreaptă din figura 42. Ştim că pentru o supernovă cu o deplasare spre roşu modestă putem folosi un set simplu de formule algebrice, prezentate în capitolul precedent, pentru a determina „distanţa dată de deplasarea spre roşu". Ne-am aştepta la o corespondenţă strânsă între aceasta şi distanţa dată de luminozitate, determinată din maximumul strălucirii supernovei. Când ne uităm însă la supernove cu deplasări spre roşu mult mai mari, privim la momente mult mai îndepărtate în timp din istoria expansiunii universului, iar diferitele scenarii ne sugerează relaţii diferite, neliniare, între deplasarea spre roşu şi distanţa dată de luminozitate. Lucrurile se complică.

Iată deci cum vom proceda. Vom folosi deplasarea spre roşu pentru a determina factorul de scară cosmică la momentul emiterii luminii. De exemplu, o deplasare spre roşu z=1 sugerează un factor de scară de 0,5; lumina a fost emisă când universul avea jumătate din dimensiunea actuală, sau distanţa medie dintre galaxii era jumătate din cea de azi. Putem folosi acum distanţa dată de luminozitate pentru a afla cât timp a călătorit lumina emisă de supernovă, deci cât timp a durat această expansiune.

Într-un univers frânat (liniile punctate din figura 42), rata expansiunii a fost *mai mare* în trecut, așa încât durează mai puțin ca universul să se extindă de la jumătate din dimensiunea lui actuală decât sugerează simpla expansiune liniară. Asta înseamnă că timpul în care lumina a călătorit de la supernova cu o deplasare spre roșu z=1 e mai *scurt* decât am anticipa pe baza legii lui Hubble. Cu alte cuvinte, distanța dată de luminozitate e mai mică, iar supernova apare ceva *mai strălucitoare.* Într-un univers care accelerat (linia întreruptă), rata expansiunii a fost *mai mică* în trecut și a durat mai mult ca universul să se extindă de la jumătate din dimensiunea lui actuală. Timpul în care lumina a călătorit e mai lung decât am anticipa pe baza legii lui Hubble. Distanța dată de luminozitate e mai mare, iar supernova apare *mai palidă.* Prin urmare, pentru o deplasare spre roșu sau un factor de scară cosmică date, într-un univers frânat, o supernovă de Tipul Ia va apărea mai strălucitoare, iar într-un univers accelerat va apărea mai palidă decât ar fi de anticipat pe baza unei simple extrapolări liniare.

În 1998, două grupuri independente de astronomi au comunicat rezultatele măsurătorii deplasărilor spre roșu ale unor galaxii îndepărtate, datorate unor supernove de Tipul Ia. Acestea au fost Supernova Cosmology Project (SCP), de la Laboratorul Național Lawrence Berkeley de lângă San Francisco, condus de Saul Perimutter, și High–z Supernova Search Team condusă de Brian Schmidt și Nicholas Suntzeff, de la Observatorul Inter–American Cerro Tololo din Chile. Rezultatele celor două grupuri sugerau că, împotriva opiniei predominante pe atunci,[102] trăim într-un univers care se extinde accelerat. Echipa High–z afirma: „Distanțele [date de luminozitate] deplasării spre roșu [pentru supernovele de Tipul Ia] sunt în medie cu 10–15% mai *mari dec*ât ar fi de așteptat într-un univers cu o densitate de masă mică [...] fără o constantă cosmologică."[103] Cu alte cuvinte, dacă privim înapoi în timp, vedem că distanțele medii dintre galaxii sunt mai mari *decât ne-am* aștepta conform unei simple extrapolări liniare sau pentru universuri cu $\Omega_M = 0{,}3$ și $\Omega_M = 1$. Aceasta este linia întreruptă din figura 42.

Rezultatele obținute de SCP indicau același lucru. „Echipele noastre, în special cea din Statele Unite, obișnuiau să se cam certe", avea să spună Schmidt câțiva ani mai târziu, într-o conferință de presă. „Universul

accelerat a fost primul lucru asupra căruia echipele noastre au căzut de acord."[104]

Adam Reiss, membru al echipei High–z, a folosit ulterior o supernovă de Tipul Ia foarte îndepărtată, numită 1997ff, descoperită din întâmplare în 1997 într-o imagine a „Hubble Deep Field" (Aceasta e o mică regiune din constelația Carul Mare, fotografiată în 1995 de Telescopul Spațial Hubble timp de 10 zile. În afară de câteva stele din Calea Lactee care se află în planul apropiat, majoritatea celor 3000 de obiecte vizibile din această regiune sunt galaxii îndepărtate. (n.a.).) obținută de Telescopul Spațial Hubble prin folosirea unei camere sensibile în infraroșu. Aceasta are o deplasare spre roșu de 1,7, ceea ce înseamnă că steaua a explodat atunci când universul avea doar 37% din dimensiunea actuală, iar distanța era de 11 miliarde de ani-lumină. Însă dacă supernovele vechi apăruseră mai palide decât conform simplei extrapolări liniare, supernova 1997ff a inversat această tendință, apărând puțin *mai strălucitoare.* Era prima observație a unei supernove din perioada când expansiunea universului fusese frânată.

Rezultatul sugera că în urmă cu aproximativ cinci miliarde de ani, expansiunea universului a suferit o inversie (priviți din nou la linia întreruptă din figura 42). După cum e de așteptat, gravitația a încetinit expansiunea universului de după big bang, până s-a ajuns într-un punct în care a început din nou accelerarea.

În 2002, astronauții din naveta spațială Columbia au instalat Advanced Camera for Surveys (ACS) pe Telescopul Spațial Hubble. Reiss, care conducea echipa High–z, a folosit ACS pentru a observa alte 23 de supernove îndepărtate de Tipul Ia. Rezultatele au fost fără echivoc. Expansiunea accelerată a fost apoi confirmată de alte observații astronomice și prin analiza variațiilor de temperatură ale radiației cosmice de fond, conform căreia $\Omega_\Lambda = 0{,}68$ (capitolul 3).

6. SOL

Originea Soarelui și a planetelor

Trebuie să recunoaștem că astrofizica – ramura astronomiei care se ocupă cu fizica universului – e o știință relativ matură. Multe dintre

principiile fizice necesare pentru a interpreta observaţiile şi măsurătorile astronomice sunt destul de bine înţelese şi se bazează pe structurile îndelung testate ale teoriei cuantice şi relativităţii generale. Această maturitate nu știrbește însă farmecul științei. Mi se pare extraordinar că secole de filosofare speculativă (şi teologizare) privind originea universului, stelelor, galaxiilor şi a planetelor cum e Pământul au cedat locul unei descrieri raționale, bazată pe principii fizice relativ simple care pot fi comparate direct cu ceea ce putem vedea şi măsura. Nu–i nevoie să înțelegi în detaliu argumentele matematice complexe pentru a–ţi face o idee despre conceptele fundamentale. Cred că oricine poate surprinde esenţa științei care descrie originea locului pe care îl numim acasă.

În ciuda maturității științei, rămân multe lucruri pe care nu le înţelegem complet. Căutarea răspunsurilor la problemele astrofizice în suspensie – de pildă, aspecte ale originii şi evoluţiei Căii Lactee sau ale originii Soarelui şi sistemului solar – este de regulă scopul studiilor cu telescoape terestre sau instalate pe sateliţi.[105] Subiectul acestui capitol e un domeniu de cercetare foarte activ.

Știm că Soarele şi sistemul solar s-au format prin colapsul gravitațional al unui uriaş nor de gaz molecular şi particule de praf. Dar ce a declanşat colapsul şi cum a avut loc? Aţi observat pesemne că în capitolele precedente nu am intrat în detaliile acestui proces. M–am mulţumit să spun că acești nori se adună datorită gravitaţiei, apar nuclee dense, care apoi colapsează pentru a forma protostele. Această explicaţie laconică nu e suficientă dacă vrem să înţelegem originea Soarelui.

Neith, „Norul Mamă”

N-am găsit nicăieri în literatura de specialitate sau pe internet un nume al acestui nor molecular gigantic, care a dat naştere Soarelui în urmă cu 4,6 miliarde de ani.[106] Desigur, norul nu mai există, de aceea putem face doar speculaţii privind felul în care s-a comportat, dar cred că merită să-i dăm un nume, aşa încât propun să-i spunem *Norul Neith*, după zeiţa egipteană, mama lui Ra, zeul Soarelui.

Putem găsi indicii legate de comportamentul Norului Neith observând nori similari în alte părți ale Căii Lactee. Am vorbit despre Barnard 68 în capitolul precedent. Norul Molecular Taurus din constelația cu același nume, aflat la doar 430 de ani-lumină de Pământ, e mai mare și ceva mai aproape de noi. Măsoară 90 pe 70 ani-lumină, are o masă totală de 15.000 $M_{\odot}$, o densitate medie de aproximativ 300 de molecule pe centimetru cub și o temperatură medie care nu diferă mult de cea a radiației cosmice de fond. Datorită apropierii de Pământ, putem studia în detaliu, prin mijloace spectroscopice, natura constituenților și distribuția lor. Deși hidrogenul molecular e un constituent important, condițiile din nor nu permit folosirea unei amprente spectrale a lui.

De pildă, nu există suficientă energie pentru a excita emisia Ha (norul nu are o strălucire de nuanță roșiatică). Studiile s-au concentrat în schimb asupra emisiei moleculei de monoxid de carbon, a doua moleculă ca abundență din univers după $_{H2}$, care e mai puțin timidă.

Monoxidul de carbon oferă linii de emisie în domeniul milimetrilor (infraroșu), corespunzând excitării și dezexcitării mișcărilor de rotație ale moleculei. Prin studiul acestor linii de emisie se poate deduce densitatea monoxidului de carbon, iar apoi densitatea hidrogenului molecular în diferite părți ale norului. Așadar, la imaginile convenționale bazate pe lumina vizibilă putem adăuga imagini deduse din emisia luminii infraroșii de către monoxidul de carbon. În plus, imagini ale mascării („extincției”) luminii stelare din spatele norului, provocată de particulele de praf care se interpun, ne ajută să cartografiem mai în detaliu conținutul norului.

Norul este destul de rece, întunecat și liniștit, la prima vedere nu pare locul ideal pentru nașterea unor stele, dar în interiorul lui au fost identificate vreo 13 „miezuri” – regiuni unde norul e îngroșat, densitățile depășesc 10.000 de molecule pe centimetru cub, dimensiunile sunt de ordinul zecilor de ani-lumină, iar masele de ordinul unei mase solare. Miezurile se înșiră ca mărgăritarele pe filamentele de gaz, care conțin majoritatea stelelor nou formate din nor. Se crede că ele se formează de-a lungul unor linii de forță generate de câmpul magnetic al norului, așa cum se aliniază pilitura de fier în jurul unui magnet.

Fiecare filament de gaz pare să se comporte ca un fel de linie de producție stelară. Mai întâi gazul și praful se condensează pentru a alcătui un miez care ulterior colapsează sub propria–i gravitație, dând naștere unei protostele, iar apoi unei stele în toată puterea cuvântului. Celor care caută ceva mai spectaculos le recomand Nebuloasa Vulturului, o regiune foarte activă de formare a stelelor, aflată la aproximativ 6500 de ani-lumină, în Constelația Șarpelui, aproape de Săgetător. Nebuloasa Vulturului conține faimoșii „Stâlpi ai Creației", imense coloane de gaz și praf interstelar, fotografiați de Telescopul Spațial Hubble în aprilie 1995 (figura 43).

Coloanele din imagine au o lungime câțiva ani-lumină și sunt compuse în principal din hidrogen molecular și particule de praf. „Degetele" care ies din coloane sunt suficient de dense pentru a satisface criteriile lui Jeans și a colapsa ca să formeze stele. Norul e luminat de radiația ultravioletă intensă provenind de la stelele nou–născute, care pune în evidență gazul evaporat din nor, modelează coloanele și dă imaginii aparența diafană.

Figura 43. *„Stâlpii Creației" sunt imense coloane de hidrogen molecular și particule de praf din nebuloasa Vulturului, aflată în constelația Șarpelui. Coloanele au o lungime de câțiva ani-lumină. Această reprezentare a fost obținută din 32 de imagini luate cu patru camere diferite montate pe Telescopul Spațial Hubble. În culori false, verdele reprezintă atomii de hidrogen, roșul – ionii de sulf (S^+), albastrul – ionii de oxigen (O^{2+}).*

Acesta e pesemne un model plauzibil pentru Norul Neith. Ne închipuim deci norul agregându-se, condensându-se, măturat eventual de vânturile stelare ale gigantelor roșii învecinate și scuturat de undele de șoc ale supernovelor din apropiere. Nori mici se contopesc pentru a forma nori mai mari în continuă mișcare.

Alinierea spinilor electronilor din atomii, moleculele sau ionii care alcătuiesc norul poate genera un câmp magnetic, iar filamentele de gaz se formează de-a lungul liniilor de forță magnetică. Datorită compresiei, atomii, moleculele și ionii se ciocnesc, excitând mișcările de vibrație și rotație moleculară de energie joasă (cum sunt rotațiile monoxidului de carbon). Moleculele excitate emit radiație infraroșie și de microunde, ceea ce duce la răcirea în continuare a norului. Între timp, particulele de

praf din nor protejează moleculele fragile de radiaţia ultravioletă şi împiedică evaporarea completă a gazului. Atomii şi moleculele se aglomerează.

Nu ne rămâne decât să aşteptăm cu răbdare ca norul să se fragmenteze pentru a forma miezuri şi mai dense, care să satisfacă criteriile lui Jeans privind masa, temperatura şi densitatea. Nu ştim dacă aceasta are loc în mod natural, printr-o evoluţie lină a norului, sau brusc, prin compresia unei unde de şoc declanşată de explozia unei supernove. Cu alte cuvinte, naşterea Soarelui a fost naturală sau indusă?

Dovezi privind o supernovă

Norul Neith a dispărut de mult, prin urmare cum putem stabili ce a provocat colapsul miezurilor lui (şi în particular a unuia dintre ele)? Răspunsul se găseşte în natura exotică a *izotopilor* produşi în procesul–r de nucleosinteză. După cum am arătat în capitolul precedent, procesul–r implică bombardarea nucleelor mici cu un flux continuu de neutroni, apărând astfel nuclee tot mai mari, care încearcă se se stabilizeze transformând unii dintre neutronii capturaţi în protoni prin reacţii induse de forţa slabă. Cei mai instabili izotopi astfel produşi se vor dezintegra foarte rapid, dar alţii vor rezista puţin mai mult. Această stabilitate e reflectată în timpul de înjumătăţire al izotopului, timpul în care se dezintegrează jumătate dintr-un număr dat de nuclee.

Iată un exemplu. Izotopul ^{26}A1, un izotop radioactiv al aluminiului cu 13 protoni şi 13 neutroni, are timpul de înjumătăţire de aproximativ 720.000 de ani. Acesta se dezintegrează pentru a forma $_{26}$Mg, cu 12 protoni şi 14 neutroni, prin emisia unei particule W^+ (care apoi se dezintegrează într-un pozitron şi un neutrin electronic), transformând un proton într-un neutron. Acest izotop se formează în cantităţi apreciabile în procesul–r de nucleosinteză din supernove.

Compoziţia actuală a sistemul solar depinde de compoziţia Norului Neith atunci când un miez din el a colapsat pentru a forma proto–Soarele. Dacă acest colaps a fost declanşat de o supernovă, atunci Norul Neith putea să fi fost contaminat cu material ejectat de unda de şoc, inclusiv cu o cantitate considerabilă de ^{26}A1. Desigur, după 4,6 miliarde de ani tot ^{26}A1 care va fi fost prezent atunci a dispărut prin

dezintegrare radioactivă. Izotopul de magneziu rezultat e însă stabil, nu mai suferă vreo transformare nucleară ulterioară, astfel încât acel ^{26}A1 prezent în Norul Neith la momentul colapsului va lăsa o urmă sub forma *îmbogățirii* cu ^{26}Mg a materialului în care a fost încorporat.

În 1974, o echipă de geologi de la Institutul Tehnologic din California condusă de Gerry Wasserburg[107] a studiat raportul dintre $_{26}$Mg și izotopul predominant $_{24}$Mg din granulele minerale[108] din meteoritul Allende, prăbușit pe 8 februarie 1969 în statul mexican Chihuahua.[109] Acesta e un *condrit carbonic,* o rocă formată prin acumularea granulelor de praf din Norul Neith pe când se forma sistemul solar. Meteoritul conține incluziuni bogate în calciu și aluminiu *(calcium–aluminium–rich inclusions*, abreviat CAI), minerale precum spinel ($MgAl_2O_4$), melilit (o combinație de $Ca_2MgSi_2O_7$ și $Ca_2Al_2SiO_7$), piroxeni și anortit ($CaAl_2Si_2O_8$, un feldspat de calciu). Figura 44 prezintă o fotografie în raze X a acestor incluziuni.

Analizele izotopice pot fi folosite la datarea unor asemenea meteoriți, confirmând astfel că sunt roci formate odată cu sistemul solar. De exemplu, datările bazate pe analiza izotopilor radioactivi de plumb arată că acești meteoriți au vârsta de 4567,2±0,6 milioane de ani.

Cititorii atenți au observat probabil că nu există magneziu în anortit, prin urmare cum se face că meteoritul conține ^{26}Mg? Dacă Norul Neith a conținut mici cantități de ^{26}Al la momentul formării Soarelui și sistemului solar, acești atomi ar fi fost încorporați în granulele de praf, deci și în incluziunile CAI ale rocilor plutind prin spațiu. În timp, ^{26}Al s-a dezintegrat în ^{26}Mg, fixat în structura minerală și conducând astfel le un raport ^{26}Mg/^{24}Mg mai mare decât e de așteptat. Aceste roci mici au rămas aproape neschimbate de-a lungul evoluției sistemului solar, rotindu-se în jurul Soarelui și fiind din când în când capturate de câmpul gravitațional al Pământului. Ele cad pe Pământ ca meteoriți precum Allende.

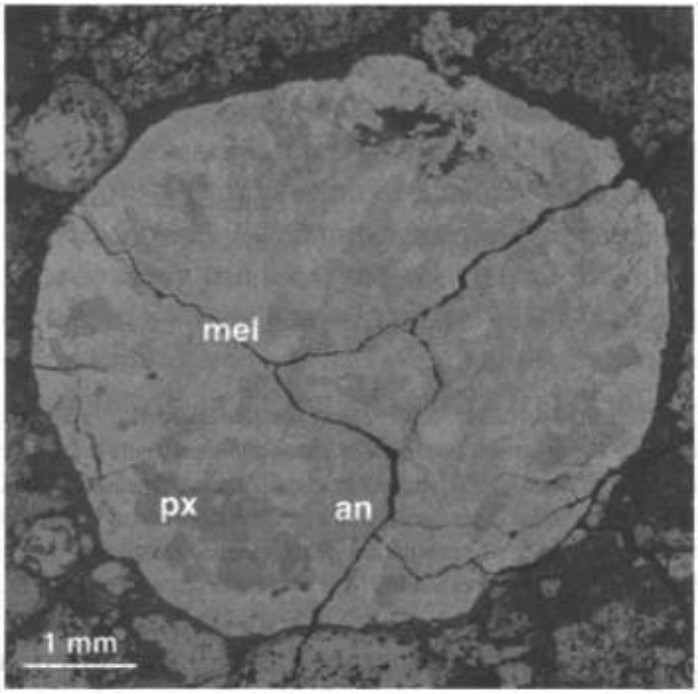


Figura 44. *Forografia în raze X a unei incluziuni bogate în calciu și aluminiu din meteoritul Efremovka, care este, la fel ca Allende, un condrit carbonic. Imaginea prezintă diferitele faze din rocă ce corespund diferitelor structuri minerale, cum e melilitul (mel), piroxenul (px) și anortitul (an). Culorile false reprezintă compoziția chimică: calciul e verde, aluminiul – albastru, magneziul – roșu. Adaptat după Ernst Zinner,* Science, *300 (2003), pp. 256–257.*

Acest raport, s-au gândit geologii, trebuia să aibă valoarea maximă la granulele minerale cu valori mari ale raportului aluminiu/magneziu. De fapt, panta graficului reprezentând raportul $^{26}Mg/^{24}Mg$ în funcție de raportul aluminiu/magneziu ($^{27}Al/^{24}Mg$) roci e corelată cu raportul $_{26}Mg/_{27}Al$. De vreme ce orice excedent de ^{26}Mg trebuie să provină din dezintegrarea ^{26}Al, panta poate fi folosită pentru a deduce raportul $^{26}A1/^{27}Al$ (figura 45), o măsură a excedentului de ^{26}Al față de izotopul stabil ^{27}Al. Altfel spus, dacă nu există un excedent de ^{26}Al, graficul ar trebui să arate ca o dreaptă orizontală (de pantă zero) la o valoare corespunzând raportului natural $^{26}Al/^{27}Al$. O pantă pozitivă indică un excedent de ^{26}Al și oferă un indiciu privind evenimentele din timpul formării sistemului solar.

Rezultatele au condus într-adevăr la o pantă pozitivă, sugerând o abundență de ^{26}Al, mult mai mult decât ar fi de așteptat de la surse care nu implică o supernovă. Măsurători ulterioare au demonstrat

importanţa izotopilor formaţi în procesele–r de nucleosinteză provocate de supernove (cum ar fi ^{41}Ca şi ^{60}Fe) din particulele de praf de la începutul sistemului solar.

Excedentul de ^{60}Fe, în special, e o dovadă grăitoare privind rolul declanşator al unei supernove.[110] Izotopul ^{60}Fe se dezintegrează în 6oni, cu timpul de înjumătăţire de 2,6 milioane de ani. Raportul ^{60}Ni/^{58}Ni în funcţie de raportul ^{56}Fe/^{58}Fe obţinut din eşantioanele minerale ale meteoriţilor Semarkona şi Chervony Kut prezintă iarăşi o pantă pozitivă, indicând un excedent de ^{60}Ni, deci un excedent de ^{60}Fe.[111]

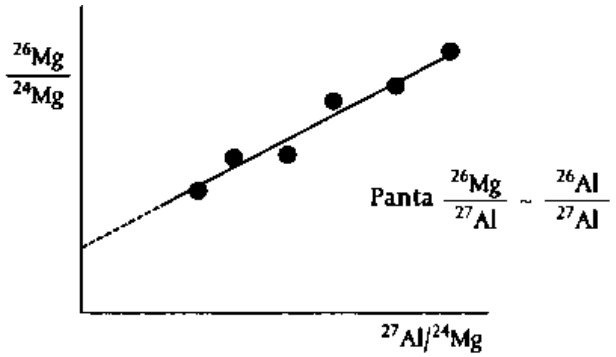


Figura 45. *Graficul raportului ^{26}Mg/^{24}Mg în funcţie de raportul ^{27}Al/^{24}Mg pentru diferite minerale cu incluziuni bogate în calciu şi aluminiu poate fi folosit pentru a deduce excedentul izotopului ^{26}Al cu timp de viaţă scurt în primele etape ale formării Soarelui şi sistemului solar. Panta graficului e corelată cu raportul ^{26}Mg/^{27}Al. Orice excedent de ^{26}Mg trebuie să provină din dezintegrarea izotopului ^{26}Al, deci din valoarea pantei putem deduce excedentul de ^{26}Al faţă de izotopul stabil ^{27}Al.*

Un studiu din 2011 sugerează că izotopul ^{26}A1 trebuie să se fi amestecat bine cu gazul şi praful din Norul Neith în decursul a aproximativ 20.000 de ani, ceea ce poate fi explicat cel mai probabil printr-o supernovă. Simulările pe calculator arată că ar dura doar 18.000 de ani pentru a îmbogăţi un nor de 10 $M_{\odot}$ cu ^{26}A1 transportat de unda de şoc a unei supernove aflată la distanţa de 16 ani-lumină.[112]

La fel ca Norul Neith acum 4,6 miliarde de ani, „Stâlpii Creaţiei” din Nebuloasa Vulturului poartă în pântece posibile stele. Norii sunt de asemenea expuşi undelor de şoc provenind de la supernovele din vecinătate. Şi, într-adevăr, observaţiile făcute cu Telescopul Spaţial Spitzer sugerează că o supernovă capabilă să distrugă norul (şi să

declanşeze formarea stelelor) a apărut deja. O bulă de gaz fierbinte şi praf în plină expansiune se îndreaptă spre coloanele din figura 43. Vom putea pesemne urmări spectacolul când unda de şoc va atinge norul, peste vreo mie de ani. Desigur, având în vedere că Nebuloasa Vulturului se află la o distanţă de 6500 de ani-lumină, vom observa evenimente care s-au petrecut deja. E posibil ca „Stâlpii Creaţiei" să fi dispărut de mult.

Ipoteza nebulară

Ideea că sistemul solar s-a format cumva dintr-un nor de gaz şi praf – o nebuloasă – are o istorie lungă şi întortocheată, dar ilustră. Filosoful suedez Emanuel Swedenborg a fost unul dintre primii care au formulat–o, într-o carte publicată în 1734, intitulată *Principiile.* Swedenborg a fost contemporan cu Newton şi puternic influenţat de filosoful francez René Descartes, pe care îl vom reîntâlni în capitolul 12. Cu greu am accepta o mare parte din descrierea lui Swedenborg, însă el credea că la începutul evoluţiei sistemului solar, particulele de materie (numite de el „finiţi") prinse într-un vârtej în jurul Soarelui au format un „cerc zodiacal", care „înconjura Soarele ca o centură sau un cerc mare".[113] Centura s-a întins, iar în cele din urmă s-a rupt, dând naştere planetelor. Swedenborg a adus şi contribuţii importante la fiziologia secolului XVIII, dar într-un vis din 1744 a avut o revelaţie divină, ceea ce i-a îndreptat preocupările spre aspecte ale misticii creştine, azi fiind cunoscut mai mult pentru lucrările lui în acest domeniu.

Filosoful german Immanuel Kant aflase de ideile lui Swedenborg, iar în 1755 a publicat *Istoria naturală universală şi teoria cerului,* în care a dezvoltat ipoteza nebulară. El susţinea că pe măsură ce nebuloasa se rotea lent, s-a aplatizat ca un disc. Soarele s-a format apoi în centru, iar planetele în planul discului, toate rotindu-se în aceeaşi direcţie.

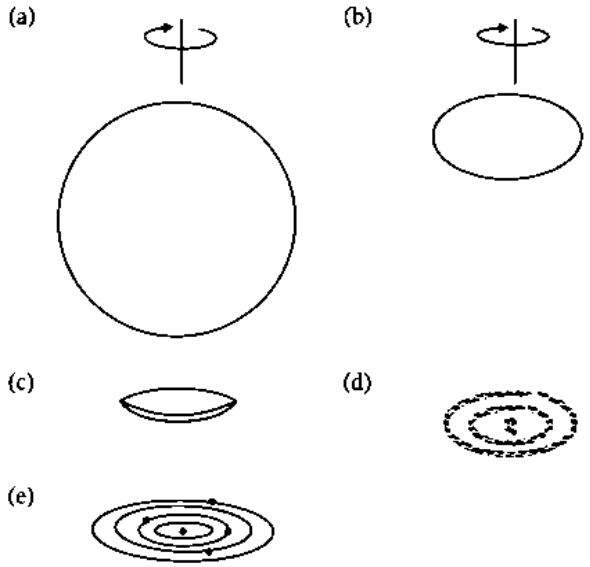


Figura 46. *În versiunea ipotezei nebulare datorate lui Kant și Laplace, formarea sistemului solar începe prin colapsarea unui nor de gaz și praf aproape sferic, aflat în rotație (a). Pe măsură ce norul colapsează, se învârte mai repede și începe să se aplatizeze (b), căpătând o formă lenticulară (c). Când nucleul colapsează în continuare pentru a forma Soarele, materia din discul aplatizat se condensează în inele circulare (d), care se condensează mai departe, formând planete (e). Adaptat după M.M. Woolfson,* Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, *34 (1993), p. 2.*

Matematicianul și astronomul francez Pierre–Simon marchiz de Laplace a elaborat independent un model asemănător, descris în *Expunere a sistemului lumii* din 1796. El a mers mai departe decât Kant. Potrivit lui Laplace, nebuloasa a fost la început un nor sferic aflat în rotație – figura 46(a). Pe măsură ce norul colapsa, viteza de rotație creștea, așa cum un patinator se învârte mai repede când își apropie brațele de corp, iar această creștere de viteză a provocat aplatizarea nebuloasei de-a lungul ecuatorului – figura 46(b) și (c). Odată cu acumularea (*acreția*) materiei din discul aplatizat, se formau inele circulare rotindu-se în jurul Soarelui, cam ca inelele lui Saturn – figura 46(d). Fiecare inel s-a condensat apoi, pentru a da naștere unei planete – figura 46(e). Ipoteza nebulară a fost predominantă în secolul XIX, dar existau unele neajunsuri, dintre care cel mai important se lega de distribuția momentului cinetic.

Momentul cinetic al unui obiect în rotație se calculează înmulțind momentul de inerție al obiectului – o măsură a rezistenței lui la accelerarea rotațională – cu viteza unghiulară în jurul centrului de rotație. Momentul de inerție e proporțional cu masa obiectului. Cu cât

masa este mai mare, cu atât momentul de inerţie este mai mare, deci şi momentul cinetic, pentru o viteză de rotaţie dată.

Momentul cinetic al Soarelui e asociat cu rotaţia lui în jurul axei sale (spin). Planetele au două surse de moment cinetic, una asociată cu mişcarea orbitală în jurul Soarelui, cealaltă cu rotaţia în jurul axei proprii (spin).[114] În cele ce urmează vom lua în considerare numai momentul cinetic de spin al Soarelui şi momentul cinetic orbital al planetelor.

Majoritatea masei sistemului solar e conţinută în Soare, care, cum ştim, are aproximativ $1{,}99\times10^{30}$ kilograme sau 1 $M_{\odot}$. Masa totală a sistemului solar este de 1,0014 $M_{\odot}$, deci masa Soarelui reprezintă reprezintă peste 99,9% din masa totală. Prin urmare, ar fi de aşteptat ca cel puţin 99,9% din momentul cinetic al sistemului solar să se afle în spinul Soarelui. Când calculăm însă momentul cinetic real al Soarelui şi al planetelor, lucrurile stau exact pe dos. Momentul cinetic asociat spinului Soarelui poate fi aproximat pe baza masei, razei ecuatoriale (696.342 kilometri) şi perioadei sale siderale de rotaţie (25,05 zile), ceea ce dă un moment cinetic de spin de aproximativ $0{,}11\text{x}10^{43}$ kilograme–metri pătraţi pe secundă.[115] Momentul cinetic orbital al celor opt planete[116] din sistemul solar este de aproximativ $3{,}14\text{x}10^{43}$ kilograme–metri pătraţi pe secundă. Cu alte cuvinte, spinul Soarelui reprezintă doar 3% din momentul cinetic total al sistemului solar. De fapt, o mare parte a acestui moment cinetic se află în mişcările orbitale ale lui Jupiter (aproximativ 58%), Saturn (25%), cu contribuţii mai mici din partea lui Uranus (5%) şi Neptun (8%). Pur şi simplu Soarele se învârte mult prea lent în jurul axei proprii. Pentru ca acesta să contribuie cu un moment cinetic în conformitate cu masa lui, ar trebui să se învârtă mult mai repede în jurul axei sale, aproximativ o dată la 77 de secunde. O stea care se învârte atât de rapid nu cred că ar fi propice formării unui sistem planetar stabil.

Existau şi alte neajunsuri. Un miez din Norului Neith care se contractă e de aşteptat să exercite o forţă asupra particulelor încărcate din norul înconjurător şi să inhibe o contracţie ulterioară. Mai era şi problema gazului rezidual de hidrogen şi heliu din discul care se învârte. Deşi se consideră că planetele s-au format prin acreţia particulelor de praf şi de

gheață, e de așteptat ca discul să conțină în mare parte hidrogen și heliu. Aceste substanțe sunt prea ușoare și volatile pentru a fi capturate în cantități mari în interiorul planetelor și în atmosfere, mai ales în cazul planetelor formate în apropierea Soarelui. Și totuși, între planete există doar spațiu gol. Unde a dispărut tot gazul interplanetar?

Aceste dificultăți păreau insurmontabile, iar ipoteza nebulară și-a pierdut din credibilitate. Astrofizicienii au căutat alte explicații, în care Soarele și planetele s-au format separat. Conform unei teorii, Soarele deja format a capturat gazul și praful necesare pentru formarea planetelor de la o protostea din vecinătate care a intrat în câmpul său gravitațional.

Dar și aceste teorii alternative aveau neajunsurile lor. Între timp, s-au adunat dovezi care sugerau că Soarele și planetele s-au format cam în același timp, cu 4,6 miliarde de ani în urmă. Studiul meteoriților condritici a dezvăluit prezența unor particule rotunde denumite *condrule*, compuse în principal din minerale de silicați, cum ar fi olivina și piroxenul, cu diametre de la câțiva microni la un centimetru. Condrulele se formează prin încălzirea rapidă și topirea particulelor de silicați la temperaturi de aproximativ 1000 K. Picăturile de silicat lichid rezultat se adună cu alte particule de praf și sunt încorporate în roci de dimensiuni mici. E un proces greu de explicat dacă presupunem că particulele (reci) de praf suferă acreția în jurul unui Soare deja format, dar exact asta neam aștepta să se întâmple într-o nebuloasă densă și fierbinte. Există de asemenea o regularitate incontestabilă în sistemul solar. Planetele orbitează în jurul Soarelui în același plan și în aceeași direcție cu spinul Soarelui. Toate acestea nu pot fi doar coincidențe și sugerează relații mecanice strânse între Soare și planete, greu de stabilit în alte teorii.

Astrofizicienii și-au dat seama că avantajele ipotezei nebulare depășesc dezavantajele ei. La sfârșitul anilor 1960, astronomul rus Victor Safronov a publicat o monografie intitulată *Evoluția norului protoplanetar și formarea Pământului și planetelor,* tradusă în engleză în 1972. Astrofizicienii au început să găsească soluții la unele dintre cele mai delicate probleme ale teoriei nebulare. Rezultatul este Modelul Discului Nebular Solar, care încorporează teorii moderne ale fizicii

formării și evoluției stelelor și planetelor, completate cu importante observații astronomice.

Obiecte stelare tinere

Indiferent dacă prăbușirea miezului din Norul Neith a fost declanșată de o supernovă din vecinătate sau nu, fapt este că gravitația preia acum controlul. Criteriile lui Jeans privind masa, densitatea și temperatura sunt întrunite, iar miezul începe să implodeze, cu o viteză depinzând de densitatea acestuia. Un miez cu o densitate de un milion de molecule pe centimetru cub va colapsa în aproximativ un milion de ani. Pe măsură ce materia din nucleu e forțată să se aglomereze, radiația infraroșie care înainte ieșea în spațiu este acum captivă, iar miezul se încălzește. Putem vorbi într-adevăr despre o protostea.

Evident, ne interesează o protostea particulară – o voi numi proto–Soare – care se formează în interiorul Norului Neith. Ea are o anumită rotație inițială, care e accelerată pe măsură ce colapsul înaintează. O parte din momentul cinetic este cedată discului de gaz și praf din jur, care se aplatizează, dar pentru continuarea colapsului va fi nevoie ca proto–Soarele să se mai debaraseze de momentul cinetic în creștere, ca să nu se învârtă prea repede în jurul axei proprii. Trebuie să se debaraseze de asemenea de propriul său câmp magnetic. Un mod de a scăpa de o bună parte din momentul cinetic implică spargerea proto–Soarelui în două protostele mai mici, care se vor roti în jurul centrului de masă comun. Acestea ar putea forma un sistem binar de stele sau s-ar putea separa, urmându–și fiecare calea. Suntem aproape siguri că sistemul nostru solar nu s-a format în jurul unei stele binare.

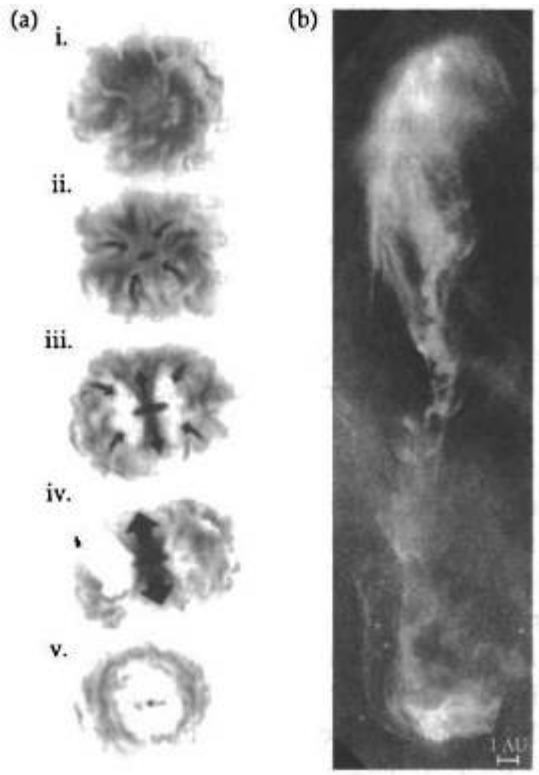


Figura 47. *Diagrama din stânga prezintă diferite etape din evoluția protostelelor, începând cu un nor molecular uriaș (i). Colapsul gazului și prafului din nor duce la formarea un miez în rotație (ii). Pe măsură ce se contractă, miezul își reduce momentul cinetic emițând la poli jeturi de gaz (iii). Gazul emis formează o nebuloasă alungită, numită Obiect Herbig-Haro, cum este HH47 prezentat în dreapta, fotografiat cu Telescopul Spațial Hubble (scara dimensională din dreapta-jos a imaginii indică 1 unitate astronomică (AU), egală cu distanța medie Pământ–Soare, aproximativ 150 de milioane de kilometri). Când protosteaua ajunge în faza T Tauri, curenții de convecție produc vânturi puternice care împrăștie materia volatilă din discul de acreție și din norul extern (iv). Protosteaua devine vizibilă și urmează calea Hayashi pentru a deveni o stea din șirul principal. Diagrama din stânga e adaptată după William H. Waller,* **The Milky Way: An Insider's Guide,** *Princeton University Press, 2013.*

Radioastronomia și studiile spectrale în infraroșu și microunde arată că multe dintre obiectele stelare tinere *(young stellar objects* – YSO) au găsit o altă soluție. Pe măsură ce se învârt, ele emit jeturi de gaz fierbinte la ambii poli. Aceste *erupții bipolare* acționează ca un fel de supape de siguranță. Când protosteaua aflată în colaps adună materie din norul înconjurător, surplusul de moment cinetic e eliberat prin jeturile rotitoare emise la poli. Asemenea protostele sunt luminoase, dar nu încă vizibile, ele fiind învăluite de norii externi de gaz și praf. Le observăm prin radiația cu lungime de undă mare reemisă de gazul și praful din nori. Acestea se numesc YSO de Clasă Spectrală o (figura 47).

Gazul ejectat trebuie să se afle în rotație, pentru că trebuie să preia din momentul cinetic al protostelei. Acest gaz poate fi observat. T Tauri e o foarte tânără stea variabilă, aflată la distanța de 460 de ani-lumină, în constelația Taurului, și a fost descoperită în 1852. Are vârsta de doar un milion de ani, iar luminozitatea ei este neregulată, impredictibilă. Ea reprezintă prototipul stelelor tinere, cu mase în intervalul 0,2–2,0 $M_{\odot}$, care n-au declanșat încă reacții de fuziune în miezul lor pentru a intra în șirul principal.

Observațiile astronomice din secolul XIX asupra stelei T Tauri au dezvăluit existența unei nebuloase în vecinătate. Astronomul american George Herbig și cel mexican Guillermo Haro au identificat în anii 1940 mai multe asemenea nebuloase, numite Obiecte Herbig–Haro. Un exemplu e în figura 47. Se crede acum că ele sunt rezultatul emisiilor bipolare ale YSO. S-ar părea că acesta e mecanismul prin care proto–Soarele s-a debarasat de o bună parte din momentul său cinetic.

Ce putem spune despre câmpul magnetic al proto–Soarelui? Astrofizicienii au apelat la un mecanism dezvoltat în fizica plasmei, numit *difuzie ambipolară.* Materia atrasă de colapsul proto– Soarelui e formată în principal din atomi neutri și molecule, dar aproximativ una la un milion de entități este ion, proton ($^{1}H^{+}$) sau electron liber. Pe măsură ce crește intensitatea câmpului magnetic în jurul proto–Soarelui aflat în colaps, aceste specii încărcate electric devin prizoniere în câmpul magnetic și se opun gravitației care le atrage spre proto–Soare. Ciocnirile dintre ioni și entitățile neutre le pot cupla indirect pe acestea din urmă cu câmpul magnetic, care acționează astfel ca o frână aplicată colapsului întregii materii.

Dacă însă densitatea ionilor din nor e scăzută (ca în cazul nostru), ciocnirile dintre ioni și entitățile neutre sunt insuficiente pentru a le cupla semnificativ pe acestea din urmă cu câmpul magnetic. Particulele neutre rămân libere să difuzeze prin câmp, reducând fluxul forței magnetice în nor, iar colapsul continuă.

Proto–Soarele are acum 10.000 de ani, dar el și alte protostele tinere formând Norul Neith continuă să ducă o existență agitată.

Turbulența supersonică din nor poate împrăștia straturile externe din jurul protostelelor, inhibând acreția ulterioară a materiei și amânând colapsul, însă poate și accelera colapsul, deplasând materie spre o protostea flămândă. Turbulența poate de asemenea apropia protostelele, făcându-le să concureze pentru gazul și praful din discurile lor de acreție și din norii externi. Unele protostele pot fi împinse în afara norului mare și lăsate să se descurce pe cont propriu.

În cele din urmă, proto–Soarele adună suficientă materie și se debarasează de suficient moment cinetic și câmp magnetic pentru a ajunge la o perioadă mai stabilă în evoluția sa. Norul extern a devenit mai subțire și mai transparent, permițând proto–Soarelui și discului său de acreție aplatizat să devină vizibile, în principal la lungimile de undă apropiate de infraroșu. A devenit un YSO din Clasă Spectrală I (figura 47). Are acum aproximativ vârsta de 100.000 de ani.

Pe traseul Hayashi–Henyey

Proto–Soarele strălucește, dar nu e încă o stea luminoasă, fuziunea nucleară nu s-a declanșat. Luminozitatea lui rezultă din conversia energiei gravitaționale eliberată prin acumularea și concentrarea materiei colapsate în energie termică. Proto–Soarele și discul său de acreție se încălzesc, iar o parte din această energie este emisă sub forma radiației infraroșii. Proto–Soarele își continuă evoluția, adunând tot mai multă materie din discul său și din norul extern, și se contractă mai departe. Curenții de convecție împing materia fierbinte din interior către zonele mai reci de la suprafață. Aceste convulsii generează vânturi puternice, care încep să îndepărteze gazele mai ușoare din discul de acreție și toată materia rămasă în norul extern.

Când temperatura ajunge la câteva milioane de kelvini, poate începe fuziunea nucleelor de deuteriu, care va elibera o anumită energie, dar cantitatea de deuteriu din miez e mică. Energia eliberată e insuficientă pentru a face față contracției gravitaționale. Procesul continuă până când proto–Soarele împlinește vârsta de un milion de ani. Nu mai e învăluit de gazul și praful rotindu-se în jurul lui, și e îndeajuns de fierbinte și de activ pentru a emite lumină vizibilă și radiație X. Devine un YSO din Clasa Spectrală II, sau o stea T Tauri (figura 47), cu

proprietățile și comportamentul caracteristice clasei de stele tinere al cărei prototip este T Tauri.

Pentru o masă dată, stelele T Tauri sunt mai reci, și totuși mai luminoase decât omoloagele lor din șirul principal. Într-o diagramă Hertzsprung–Russell ele se află deasupra și la dreapta locului din șirul principal în care ar fi de așteptat să se găsească o stea cu aceeași masă.[117] Poziția proto–Soarelui pe scara de temperatură a suprafeței e determinată de raportul dintre opacitatea sa și convecție, așa cum am arătat în capitolul 4. Stelele mai reci au tendința să fie mai opace, capturând mai multă radiație și creând mari diferențe de temperatură între miez și suprafață, ceea ce declanșează curenți de convecție turbulenți destabilizatori. Proto–Soarele își păstrează stabilitatea rămânând fierbinte.

Dar cât de fierbinte? în 1961 astrofizicianul japonez Chushiro Hayashi a descoperit că există o limită a temperaturii de la suprafață (limita Hayashi) sub care o stea tânără e instabilă în fața propriilor ei curenți de convecție. Pentru proto–Soare, această temperatură e de circa 4500K. Temperaturile mai mici (din dreapta diagramei Hertzsprung–Russell) sunt „interzise". Luminozitatea unei stele depinde însă atât de temperatura de la suprafață, *cât și* de raza sa,[118] iar proto–Soarele se contractă mai departe. Pe măsură ce se contractă, temperatura miezului crește, și el devine tot mai puțin opac. Gradienții de temperatură se micșorează, convecția se domolește. Rezultatul este că luminozitatea protostelei scade pentru că aceasta se contractă.

În continuare, luminozitatea proto–Soarelui scade, dar temperatura de la suprafață rămâne aproape constantă. Asta înseamnă că pe o diagramă Hertzsprung–Russell urmează o „traiectorie Hayashi" aproape verticală, îndreptându-se în jos către dreapta șirului principal (figura 48).

Proto–Soarele are acum zece milioane de ani. Mare parte din discul lui de acreție (pe care îl vom numi de acum înainte *disc protoplanetar)* a rămas fără gaz și praf, iar radiația infraroșie a dispărut. Este în continuare o stea T Tauri, intrând în Clasa Spectrală III YSO. Proto–Soarele se află în ultimele etape ale evoluției către fuziunea termonucleară, șirul principal de vârstă zero (punctul din șirul

principal la care stelele îşi încep viaţa). Trebuie să avem însă răbdare, acest ultim pas durează multe zeci de milioane de ani.

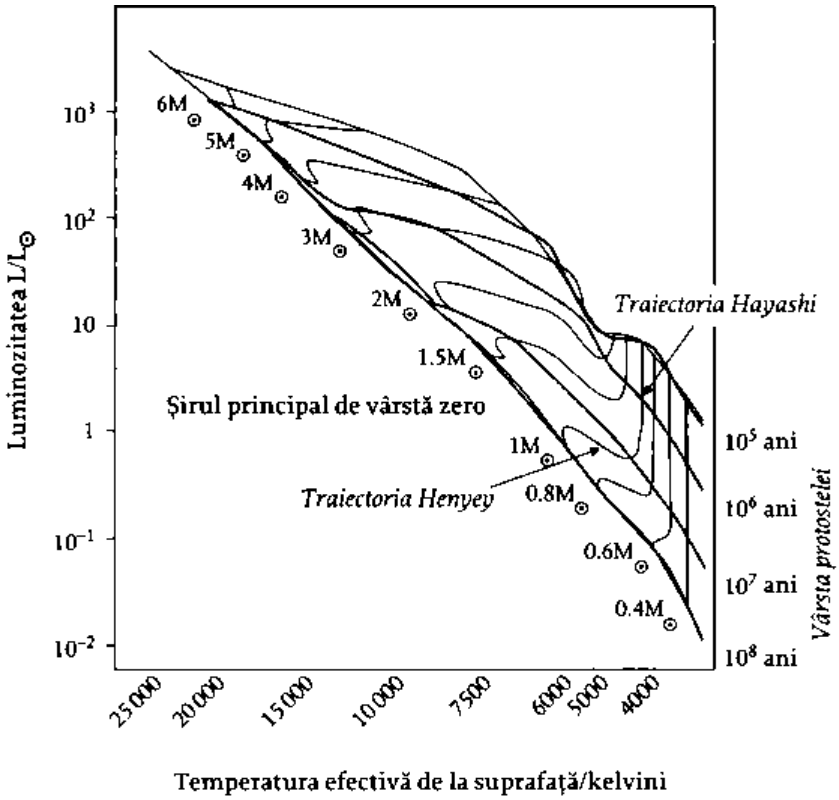


Figura 48. *Evoluţia obiectelor stelare tinere este determinată de relaţiile fizice între masă, densitate, temperatura miezului, opacitate, diferenţele de temperatură şi convecţie. Această figură prezintă traiectoriile Hayashi–Henyey pentru o gamă de mase solare. Cu cât masa e mai mare, cu atât protosteaua evoluează mai repede.*

Contracţia e încetinită, fără să fie însă oprită, convecţia a încetat complet, ceea ce înseamnă că ne aflăm la capătul traiectoriei Hayashi, iar luminozitatea nu mai scade. Corelaţiile subtile dintre presiune, densitate, opacitate şi temperatura miezului fac să crească temperatura de la suprafaţă. Luminozitatea creşte uşor (depinzând, în linii mari, de temperatura de la suprafaţă la puterea 4/5), deşi raza continuă să se contracte.

Pe diagrama Hertzsprung–Russell, Proto–Soarele se deplasează la stânga şi puţin în sus (figura 48). Aceasta e traiectoria Henyey, numită după astronomul american Louis Henyey, care a publicat în 1995 rezultatele calculelor privind traiectoriile evoluţiei stelelor înainte de a intra în şirul principal.

Au trecut 100 milioane de ani de când Norul Neith s-a fragmentat şi au început să formeze miezurile proto–stelare. Pe măsură ce s-a contractat, tânărul proto–Soare şi-a eliberat o bună parte din momentul cinetic prin jeturile bipolare, reducându–şi viteza de rotaţie în jurul axei proprii. Şi-a controlat câmpul magnetic prin difuzie ambipolară. A devenit o stea T Tauri, urmând traiectoriile Hayashi şi Henyey către şirul principal, luminozitatea lui scăzând, iar apoi crescând puţin, pe măsură ce temperatura de la suprafaţă creştea. Soarele este pe punctul de a se naşte.

Între timp, pe discul protoplanetar

Înainte să facem ultimul pas, să ne întoarcem şi să privim evenimentele care au loc în discul de acreţie, „clătita" de gaz şi praf rotindu-se în jurul ecuatorului proto–Soarelui. Se numeşte disc de acreţie deoarece materia din alcătuirea lui e atrasă – prin procesul de acreţie – către proto–Soarele aflat în centru. Dar termenul de acreţie se aplică şi procesului prin care mici granule de praf şi de gheaţă din disc se ciocnesc şi se alipesc, dând naştere unor granule tot mai mari.

Masa discului reprezintă doar circa 0,2% din masa norului care colapsează, dar în disc se petrec lucruri extrem de importante pentru noi. În compoziţia lui intră hidrogen şi heliu gazos – 98% – şi grăunţe de praf (metale şi silicaţi) şi gheaţă (formată din molecule de apă, amoniac, metan etc.) – 2%. Raza discului are aproximativ 15 miliarde de kilometri.

Pe măsură ce temperatura proto–Soarelui creşte, el încălzeşte discul din interior spre exterior. Materia discului e mai condensată în apropierea proto–Soarelui, iar ciocnirile frecvente dintre particule contribuie la sporirea energiei lor cinetice şi cresc temperatura. O parte din această energie e eliberată prin emisia radiaţiei infraroşii, dar diferenţele de temperatură se accentuează, temperaturile din părţile interioare ale discului fiind ridicate, iar cele de la periferie mult mai scăzute.

La o distanţă de aproximativ 150 milioane de kilometri de centru (distanţa actuală dintre Pământ şi Soare) temperaturile în această etapă timpurie din evoluţia discului erau de circa 1000 K. Mai departe, la distanţe de 400–700 milioane de kilometri, temperatura scădea până

la 100–200K. Acest gradient de temperatură va avea un efect profund asupra evoluției ulterioare a materiei discului. Temperatura de topire a fierului este puțin peste 1800K. Dioxidul de siliciu (SiO_2) se topește la 1800–2000 K. Forsteritul (Mg_2SiO_4), un minereu din familia olivinelor bogat în magneziu, se topește la peste 2000 K. În ciuda temperaturilor înalte din partea interioară a discului, granulele bogate în metale și silicați rămân în stare solidă.

Acest lucru nu e valabil și pentru particulele de gheață. Știm că la presiunea atmosferică normală, apa se topește la 273K și fierbe la 373K. Amoniacul solid se topește la aproximativ 195K și fierbe la 240K. Metanul solid se topește la 91K și fierbe la 113K.

Prin urmare, particulele de gheață din partea interioară a discului sunt vaporizate, transformându-se în gaz, și expulzate în exterior de vânturile turbulente.

Într-un fel, materia discului e *distilată*. Materia mai grea și mai puțin volatilă continuă să fie solidă și rămâne pe loc, iar o parte din materia ușoară migrează către exterior până ajunge într-o regiune suficient de rece ca să condenseze, mai întâi în lichid, apoi din nou în gheață solidă. Astrofizicienii au identificat o „linie de îngheț” (termen împrumutat din pedologie), la o distanță de 400–700 milioane de kilometri de Soare. Dincolo de linia de îngheț, temperaturile sunt suficient de scăzute pentru ca materia volatilă să formeze iarăși particule de gheață. Dacă la început discul are un amestec uniform de materiale, în timp, concentrația de particule grele crește în zona interioară a discului, iar particulele ușoare se evaporă și se condensează în zona externă.

Se formează două regiuni distincte ale discului: o regiune internă „stâncoasă”, dincoace de linia de îngheț, și o regiune externă „glacială”. Desigur, separarea materialelor pe baza volatilității lor nu e completă. Dacă discul are la început o distribuție uniformă a materiei, atunci ne așteptăm să găsim granule mai grele, conținând metale și silicați, și în regiunea externă. De fapt, pe măsură ce apa, amoniacul, metanul și alte substanțe volatile se condensează, e probabil s–o facă în jurul granulelor solide, grele, și a particulelor de gheață care persistă aici, unde temperatura e scăzută.

Planetezimale și protoplanete

Proto–Soarele devine o stea T Tauri la aproximativ un milion de ani după colapsul inițial al nucleului și își începe călătoria pe traiectoria Hayashi. Granulele de praf și gheață din discul de acreție se ciocnesc și uneori se contopesc, alteori se dezmembrează. Dar granulele nu se mișcă în spațiul gol. Discul e încă plin cu un gaz dens de hidrogen și heliu. Granulele care au ajuns la diametre de câțiva milimetri, centimetri sau chiar metri sunt atrase mai puternic de gravitația proto–Soarelui decât gazul prin care se deplasează, ceea ce le încetinește. Incapabile să reziste atracției gravitaționale către centru, ele coboară pe o traiectorie spirală.

Lucrurile se întâmplă altfel dincolo de linia de îngheț. Moleculele de apă, care au fost eliberate din gheață, se acumulează și interacționează cu atomii de hidrogen și heliu, provocând scăderea presiunii gazului. Presiunea unui gaz e determinată de vitezele cu care atomii sau moleculele lui se mișcă (în direcții aleatorii). Astfel că, pe măsură ce atomii de hidrogen și heliu sunt încetiniți, ei devin mai expuși atracției gravitaționale a proto–Soarelui și orbitează mai rapid. Particulele mici deplasându-se printr-un gaz orbitând mai repede nu mai simt că vântul bate din față, ci din spate, ceea ce le sporește viteza și face mai puțin probabil să fie atrase spre centru.

Rezultatul este că granulele de praf și gheață din partea externă, mai rece, a discului sunt atrase spre linia de îngheț și se acumulează acolo. Acreția materiei continuă, iar în cele din urmă se formează obiecte cu diametre de zece kilometri, numite *planetezimale*, ceea ce vrea să spună că sunt fragmente mici care vor deveni planetele. Aceasta se întâmplă atât în partea internă, cât și în cea externă a discului, dar datorită acumulării materiei la linia de îngheț, aici procesul e accelerat.

E un proces greu de imaginat. Știm din experiență că aruncând pietre unele în altele, ele nu se lipesc. Trebuie să ne închipuim însă aceste mici granule și particule de gheață plutind laolaltă în discul de acreție, atingându-se din când în când delicat sau apăsându-se reciproc. Granulele conținând metal se pot atrage prin câmpurile lor magnetice. Dacă granulele de silicați care se ciocnesc se încarcă electrostatic,

aceasta ar putea fi de-ajuns ca ele să se unească. În monografia sa, Safronov a conceput un model al procesului de acreție folosind teoria coagulării, așa cum e aplicată în studiul coloizilor.

Formarea planetezimalelor indică o schimbare fizică subtilă. Obiecte cu asemenea dimensiuni pot exercita propriile lor efecte gravitaționale. Planetezimalele dintr-o anumită zonă orbitală concurează acum între ele, ca într-o competiție de tipul „ultimul șobolan rămas în picioare”.[119] Planetezimalele vecine se ciocnesc și fie se contopesc, fie se sparg. Cu cât planetezimala devine mai mare, cu atât cresc gravitația ei și capacitatea de a atrage spre ea planetezimale mai mici.

În ipoteza nebulară Kant-laplace se considera că materia din discul de acreție se acumulează pur și simplu în benzi care orbitează în jurul proto–Soarelui, iar benzile se reunesc pentru a forma planete. Pare ceva ordonat și dirijat, sistemul planetar desăvârșit fiind unicul rezultat logic al fizicii. În realitate, îmbulzeala planetezimalelor e haotică, iar rezultatul nu poate fi garantat. Agitația continuă și când planetezimalele devin *protoplanete* de dimensiunea Lunii, care are un diametru de aproximativ 3500 kilometri. Discul este acum un disc protoplanetar.

Ascensiunea giganților de gaz și gheață

Evenimentele se desfășoară rapid în vecinătatea liniei de îngheț. Acumularea și concentrarea materiei a accelerat formarea planetezimalelor și a produs o protoplanetă cam de dimensiunea Pământului (cu un diametru de aproximativ 12.000 km). Aceasta își atrage din disc un înveliș gazos de hidrogen și heliu. Cu alte cuvinte, dobândește o atmosferă. Pentru a reuși acest lucru, gazul trebuie să fie suficient de rece ca să rămână captiv în câmpul gravitațional al protoplanetei. Dacă gazul e prea fierbinte, atomii și moleculele lui vor avea o energie cinetică și o viteză prea mari, și vor evada.

Încă o dată relația dintre opacitatea gazului și gradienții de temperatură dintre nucleu și suprafață este esențială. Dar pe măsură ce își acumulează atmosfera, protoplaneta devine și mai masivă, iar tăria atracției gravitaționale reciproce dintre ea și proto–Soare crește. Protoplaneta poate migra de pe orbita ei inițială spre linia de îngheț,

unde „vântul din spate” o ajută să se stabilizeze, accelerând–o până la o viteză orbitală care îi permite să reziste atracției gravitaționale.

Protoplaneta acumulează în continuare atmosferă, adunând gazul din traiectoria ei orbitală și creând în disc o bandă de vid aproape circulară. Protoplaneta e acum suficient de mare pentru a mătura imediat orice gaz care se scurge în acest vid. Este pe cale să devină planeta Jupiter. Nu e o coincidență faptul că cea mai mare planetă din sistemul solar s-a format în apropierea liniei de îngheț, cu o rază orbitală de aproximativ 780 de milioane de kilometri. Se crede că Jupiter are un nucleu stâncos (dar nu cunoaștem compoziția lui reală) înconjurat de o atmosferă compusă din 75% hidrogen și 24% heliu, în termeni de masă. Masa lui totală este de 318 ori mai mare decât cea a Pământului, însă Jupiter e mult mai puțin dens.

Apariția primei planete gigantice de gaz înlesnește nașterea celorlalte. Pe măsură ce se formează, Jupiter creează o bandă de vid în discul din jurul proto–Soarelui. Aceasta acționează ca o barieră în calea materiei din regiunea externă, care e atrasă gravitațional spre proto–Soare, determinând o acumulare asemănătoare celei din apropierea liniei de îngheț. Ce anume împiedică această materie să fie atrasă în banda goală și să fie absorbită de Jupiter? Avem iarăși de-a face cu diferența de presiune dintre gaze. Presiunea gazului dincolo de bandă creează un „vânt din spate”, care ajută planetezimalele și protoplanetele să reziste atracției gravitaționale și le dă timp să acumuleze masă.

Dar, la fel ca–n viață, primul sosit e premiat. Protoplanetele care se formează dincolo de Jupiter au la dispoziție mai puțin gaz pe care să-l adune în atmosferele lor. Vânturile dinspre proto–Soare au făcut pesemne și ele să scadă cantitatea de gaz. În consecință, Saturn e mult mai mic decât Jupiter, având o masă de 95 ori mai mare decât cea a Pământului. Se crede și despre el că are un nucleu stâncos, cu o atmosferă compusă în principal din hidrogen, cantitatea de heliu fiind mult mai mică decât cea a lui Jupiter.

Deși Uranus și Neptun se află acum mult dincolo de Saturn, astrofizicienii nu cred că ele s-au format acolo. Sunt prea mari. Se consideră că densitatea materiei din discul protoplanetar la distanțele lor actuale era prea mică pentru ca aceste planete să se formeze

suficient de repede. Probabil că Uranus şi Neptun s-au format mult mai aproape de Saturn, în poziţii inversate faţă de cele din prezent, Neptun mai aproape, iar Uranus mai departe. Densitatea planetezimalelor se crede că era mult mai mare aici, iar protoplanete cu mase de 15 şi 17 ori mai mari decât cea a Pământului se puteau asambla relativ uşor. Cea mai mare parte a gazului din această regiune fusese însă capturată de Jupiter şi de Saturn, nou–veniţilor rămânându-le puţin. Prin urmare, aceste planete nu sunt giganţi de gaz, ci de gheaţă.

Dincolo de Uranus se întinde o bandă de planetezimale şi protoplanete prea rarefiată pentru a da naştere unor planete propriu–zise. Această bandă de stânci şi bucăţi de gheaţă, pe care o vom numi centura Kuiper, după astronomul american de origine olandeză Gérard Kuiper, va suferi transformări spectaculoase. Ea a fost descoperită în 1992, iar în prezent se află la aproximativ 7500 de milioane de kilometri de Soare. Pluto, considerat acum planetă pitică, este cel mai mare obiect din centura Kuiper, având o orbită foarte excentrică, apropiindu-se de Soare la 4500 de milioane de kilometri.

Formarea planetelor terestre

Planetele dincolo de linia de îngheţ au luat startul mai repede. După zece milioane de ani, când proto–Soarele intră de pe traiectoria Hayashi pe traiectoria Henyey, discul intern e o adunătură haotică de circa o sută de protoplanete, cu dimensiuni cuprinse între cea a Lunii şi cea a lui Marte, înotând într-o supă diluată de planetezimale. Pentru a evolua, aceste protoplanete trebuie să se ciocnească şi să se contopească. O mare parte din gaz a dispărut, atras de proto–Soare sau spulberat de vânturile intense, dar planetezimalele pot perturba suficient orbitele protoplanetelor pentru a le face să se ciocnească. E de asemenea posibil ca efectele gravitaţionale ale lui Jupiter să fi jucat un rol în devierea protoplanetelor pe un traseu pe care să acumuleze materie.

O consecinţă a prezenţei timpurii a lui Jupiter pare evidentă. Relaţiile dintre orbita lui Jupiter şi orbitele planetezimalelor sau protoplanetelor învecinate determină stabilirea unor *rezonanţe orbitale.* Gândiţi–vă la un copil care e dat în leagăn. Părintele îşi sincronizează împingerile cu perioada de oscilaţie a leagănului, intervenind cu un impuls suplimentar exact la momentul potrivit pentru a creşte viteza şi

amplitudinea oscilației. În mod asemănător, coincidențele în perioadele corpurilor care orbitează[120] pot spori efectele gravitației și destabiliza o orbită sau alta.

Nu–i o competiție la care toți au șanse egale. Dacă e prinsă într-o rezonanță orbitală cu Jupiter, o planetezimală sau o protoplanetă câștigă energie și e accelerată. Aceste corpuri dobândesc prea multă energie, iar ciocnirile dintre ele, în loc să fie constructive, sunt în mare măsură destructive. Unele sunt deviate de pe orbitele lor și atrase în interior, dar majoritatea sunt azvârlite în afara sistemului solar.

Încercarea de a forma o planetă terestră chiar pe linia de îngheț se dovedește a fi inutilă. Prin urmare, stâncile și bucățile de gheață care alcătuiesc *centura de asteroizi* nu suferă procesul de acreție. În prezent, aproximativ jumătate din masa acestei centuri e conținută în doar patru asteroizi mari – Ceres (de fapt, o planetă pitică, cu diametrul de 950 km), Vesta (525 km), Pallas (544 km) și Hygiea (un asteroid oval cu o lungime de aproximativ 500 km). În total, milioane de asteroizi sunt răspândiți prin centură, și avem motive întemeiate să credem că în trecut centura era mult mai dens populată.

Fără ajutorul efectelor de accelerare ale materiei acumulate în jurul liniei de îngheț, planetele terestre interioare s-au format în timp mai îndelungat – 100 milioane de ani față de 10 milioane, cât a fost necesar pentru giganții de gaz și gheață. În timp, aceste planete terestre în formare „curăță" spațiul din vecinătatea orbitei lor, măturând orice planetezimală și devenind obiectul cel mai masiv („ultimul șobolan rămas în picioare") din zona lor orbitală. În cele din urmă, ele vor ajunge să fie Mercur, Venus, Pământ, Theia și Marte, dar mai au un drum lung de parcurs.[121]

Aprinderea

Universul are acum 9,2 miliarde de ani. Primele stele s-au născut și au murit. Calea Lactee s-a format în interiorul unui halou de materie întunecată, gazul și praful barionic rămase de la primele stele s-au condensat pentru a forma a doua generația de stele din Populația a II-a. Multe dintre ele au dispărut, însămânțând mediul interstelar din Calea Lactee cu elemente grele sintetizate în interiorul lor sau în

spectaculoasele explozii ale supernovelor. Norii care se mișcă în derivă și încep iarăși să se adune sunt și ei presărați cu granule de praf și particule de gheață.

Acum, la o sută de milioane de ani după colapsul inițial petrecut în Norul Neith, miezul format e gata să dea naștere unei stele de a treia generație din Populația I. Proto–Soarele ajunge la capătul traiectoriei Henyey. Temperatura miezului ajunge la peste zece milioane de kelvini și este inițiat lanțul de reacții nucleare proton–proton. Ar fi tentat să ne închipuim că un întrerupător e apăsat, întunericul lasă locul luminii, iar proto–Soarele devine Soare, dar e un scenariu înșelător. Proto–Soarele strălucea deja, radiind lumina eliberată de gazul fierbinte din apropierea suprafeței sale, pe măsură ce colapsa.

Ceea ce s-a schimbat cu adevărat e faptul că Soarele are acum propria sa sursă internă de energie, producând radiația care îl poate menține, opunându-se continuării contracției gravitaționale. Când Soarele își ocupă acum locul în șirul principal, la vârsta zero, luminozitatea lui scade puțin (figura 48). Pe măsură ce Soarele se stabilizează, vânturile stelare spulberă ultimele rămășițe de gaz, lăsând doar spațiu vid între planetele care orbitează. Planeta Pământ nu are încă o lună, iar planetele externe nu se află unde le găsim în prezent. Avem toate obiectele necesare, rămâne să le plasăm la locul lor.

7. Terra Firma

Originea unui Pământ locuibil

Cât din această poveste a formării Pământului se bazează pe fapte, și cât e ipoteză științifică? Trebuie să fim mereu conștienți că reconstruim istoria unor evenimente petrecute cu multe miliarde de ani în urmă. Aplicăm teoriile științifice în vigoare pentru a deduce ce anume *putea* să se fi întâmplat, pe baza felului în care ne apar azi planetele, Soarele, stelele și norii moleculari gigantici. Povestea se va modifica inevitabil în unele aspecte esențiale, pe măsură ce vom înțelege mai bine universul.

De pildă, deși Modelul Discului Nebular Solar e în prezent larg acceptat de astrofizicieni, există idei alternative. În ciuda logicii care leagă un disc rotitor de gaz și praf cu planetele care împart același plan orbital și aceeași direcție de rotație, un studiu recent (2012) sugerează că e

totuși posibil să se ajungă la aceleași rezultate pornind de la un nor rece tridimensional și aplicând pur și simplu legile termodinamicii.[122]

Toate raționamentele noastre privind formarea sistemelor planetare se limitau la un exemplu pe care îl cunoaștem, propriul nostru sistem solar, însă în aprilie 1992 a fost făcută prima observație, confirmată apoi, a unor planete extrasolare sau *exoplanete* – corpuri orbitând alte stele decât Soarele.[123] De atunci, au fost descoperite o mulțime. În prezent sunt consemnate 3696 de exoplanete în 2771 de sisteme exoplanetare, dintre care 620 conțin mai multe exoplanete. Detalii pot fi găsite pe platforma online Extrasolar Planets Encyclopaedia a astronomilor de la Observatorul din Paris.[124] Acest catalog conține mai curând exoplanete gigantice, de dimensiunea lui Jupiter sau mai mari, deoarece ele sunt mai ușor de detectat.[125] În martie 2009, Observatorul Spațial Kepler a fost lansat de NASA pentru a căuta exoplanete asemănătoare Pământului. Până în 2013, când s-a defectat, Kepler a găsit aproximativ 3500 exoplanete, cele mai multe dintre ele deocamdată neconfirmate.[126]

Aproximativ unu la sută dintre exoplanetele din catalog au mase între 0,5 și 2 mase terestre ($M_{\oplus}$). Primele exoplanete asemănătoare Pământului au fost anunțate de astronomii misiunii Kepler în decembrie 2011. Un sistem cu cinci exoplanete a fost observat orbitând o stea numită Kepler–20, ceva mai mică și mai rece decât Soarele, aflată la aproximativ 950 ani-lumină de Pământ. Dintre acestea, trei sunt mari, cu mase de circa 9,16 și 20 $M_{\oplus}$ (pentru comparație, Jupiter are 318 $M_{\oplus}$). Kepler–20e și Kepler–20f au însă mase de 0,39–1,67 $M_{\odot}$ și 0,66–3,04 $M_{\oplus}$, cu raze de 0,87 $R_{\oplus}$, respectiv 1,03 $R_{\oplus}$, unde $R_{\oplus}$ e raza Pământului. La momentul anunțului, Kepler–20e era prima exoplanetă cu o rază mai mică decât cea a Pământului.

Aceste exoplanete sunt cam de dimensiunea Pământului, dar nu seamănă cu el. Kepler–20e orbitează în jurul stelei sale o dată la 6 zile și are la suprafață temperatura de circa 1000 K. Perioada orbitală a lui Kepler–20f este de 19,6 zile, iar temperatura e de peste 700 K. Aceste exoplanete sunt prea apropiate de steaua lor și, prin urmare, prea fierbinți ca să existe apă lichidă pe ele sau la mică adâncime. Prin

urmare, ele nu orbitează în „zona locuibilă” (numită și „zona Goldilocks”[127]) a stelei lor, unde e atins echilibrul ideal între luminozitatea stelei și raza orbitei, care asigură cantitatea necesară de lumină și căldură pentru a menține o temperatură favorabilă vieții.[128]

Candidați mai promițători au fost găsiți de astronomi în aprilie 2013. Kepler–62 este de asemenea ceva mai bătrână, mai mică și mai rece decât Soarele, aflându-se la 1200 ani-lumină de Pământ, în constelația Lira, având tot cinci exoplanete, între care două „super–Pământuri”, botezate Kepler–62e și Kepler–62f, cu mase mai mici de 36 $M_{\oplus}$, respectiv 35 $M_{\oplus}$, și raze de 1,61 $R_{\oplus}$, respectiv 1,41 $R_{\oplus}$. Interesant la aceste exoplanete e faptul că au perioade orbitale de 122, respectiv 267 zile, și temperatura la suprafață de 270, respectiv 208K, ceea ce le plasează dar în zona locuibilă a stelei lor (figura 49).

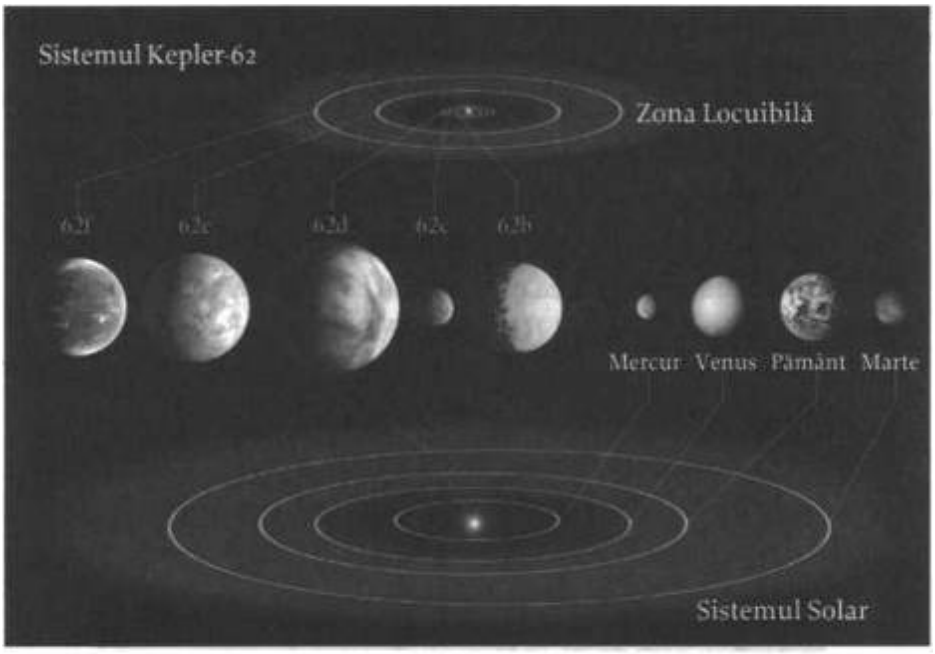


Figura 49. *Desen reprezentând sistemul exoplanetar al lui Kepler-62 și o comparație cu planetele terestre din sistemul nostru solar. Exoplanetele Kepler-62e și Kepler-62f sunt „super-Pământuri“, cu raze de 1,61 $R_{\oplus}$ și 1,41 $R_{\oplus}$, orbitând în „zona locuibilă“ a sistemului, cu perioade orbitale de 122 și 267 zile. Cele două seturi de planete sunt desenate la aceeași scară.*

Câte asemenea exoplanete ar putea exista în Calea Lactee? Câmpul vizual al lui Kepler se limita la un petec de cer în direcția constelațiilor Lebăda, Lira și Dragonul, aproximativ 0,25% din firmament. Un studiu

din 2013 privind 42.000 de stele asemănătoare Soarelui observate de Kepler sugerează că 22% din ele posedă exoplanete asemănătoare Pământului (exoplanete de dimensiuni comparabile cu ale Pământului, orbitând în „zona locuibilă" a stelei lor). Astronomii au dedus că ar putea exista în Calea Lactee 11 miliarde de exoplanete asemănătoare Pământului, care orbitează stele asemănătoare Soarelui, cea mai apropiată putând fi la doar 12 ani-lumină.[129]

Ajungem astfel la următoarea întrebare: dacă putem vedea exoplanete, putem vedea și sisteme exoplanetare în procesul formării lor? În fond, deși observațiile altor sisteme solare nu ne arată neapărat cum a apărut sistemul nostru solar, ele oferă indicii importante. Răspunsul la întrebare este da. Unul dintre primele exemple de sistem solar cu disc circumstelar de gaz și praf este Beta Pictor, din constelația Pictorul, la circa 62 ani-lumină de Pământ. E o stea tânără, cu vârsta estimată la 8–20 milioane de ani. A ajuns deja în șirul principal și posedă un disc plat de gaz și praf, fotografiat de Telescopul Spațial Hubble în 2003.

În noiembrie 2008, astronomii de la Observatorul Sudic European au anunțat că găsiseră o exoplanetă orbitând Beta Pictor aproape de planul discului. Beta Pictor b are o masă de ordinul a 2000 $M_{\oplus}$ și orbitează steaua la distanța de 1,2–1,4 miliarde de kilometri (aproximativ distanța Soare–Saturn), cu perioada de 17–21 ani. Studii recente sugerează că planeta e mai tânără decât steaua, așa încât s-ar putea să fim martori la procesul formării unui sistem planetar.

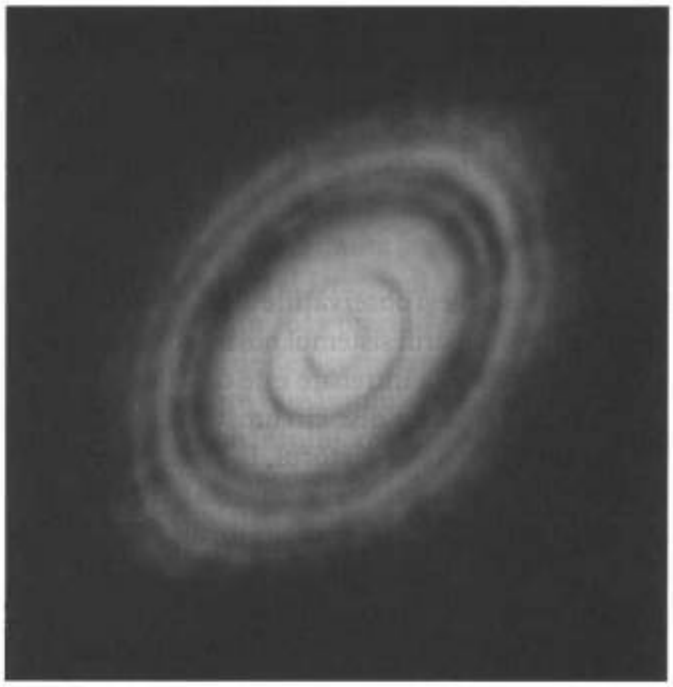


Figura 50. *În această imagine de la observatorul ALMA din Chile, discul protoplanetar înconjurând HL Tauri se vede clar sub forma unei serii de inele concentrice separate de spaţii goale. HL Tau se află la circa 450 ani-lumină de Pământ, în Norul Molecular Taurus din constelaţia Taurului.*

Poate că imaginea cea mai frapantă a unui disc protoplanetar a fost publicată de astronomii de la ALMA (Atacama Large Millimeter/sub–millimeter Array) din Chile, un observator finanţat în comun de agenţiile europeană, nord–americană, est–asiatică şi de statul chilian. Imaginea e prezentată în figura 50. Vedem o tânără stea T Tauri numită HL Tauri (HL Tău), cu vârsta de circa un milion de ani, aflată în Norul Molecular Taurus, la vreo 450 ani-lumină de Pământ, în constelaţia Taurului. Există numeroase alte exemple de stele tinere posedând discuri circumstelare, pe care astronomii le consideră discuri protoplanetare sau *proplide.*

Indiferent dacă s-a format într-un disc protoplanetar plat, în rotaţie, sau într-un nor de gaz şi praf tridimensional, nu încape îndoială că Pământul a fost creat pe când Soarele colapsa şi se aprindea, pentru a–şi lua locul în şirul principal, cu 4, 6 miliarde de ani în urmă

Catastrofa fierului

Nu–i greu să ne închipuim ce urmează. Proprietăţile fizice şi comportamentul unei mari sfere de rocă şi metal sunt determinate de

proprietățile materialelor care o alcătuiesc – în principal minereuri de siliciu, oxizi metalici și unele substanțe ușoare, volatile, cum ar fi apa, captive în structura rocilor, precum și urme de alte elemente chimice formate în nucleosinteza stelară. Pământul e compus în mare parte din șase elemente: fier (31,9%), oxigen (29,7%), siliciu (16,1%), magneziu (15,4%), calciu (1,71%) și aluminiu (1,59%). Restul de 3,6% este format din toate celelalte elemente din tabelul periodic până la uraniu, prezent în cantități de ordinul a câteva sutimi până la câteva zeci de miimi de părți pe milion.

Ceea ce urmează poartă numele de *diferențiere planetară.* Materia se acumulează pentru a alcătui o sferă tot mai mare de rocă și metal, iar presiunile și temperaturile din nucleu încep să crească. Există și izotopi radioactivi cu timp de viață scurt, care, deși în cantități mici, eliberează multă energie la dezintegrare, crescând suplimentar temperatura. Lucrurile încep să se schimbe în momentul când temperaturile depășesc punctului de topire al oxizilor metalici și al silicaților.

Parametrii critici sunt densitatea (masa pe unitatea de volum) și *miscibilitatea.* Metalul topit e mai dens decât silicații topiți, și, precum uleiul și apa, cele două nu sunt miscibile – nu se amestecă. Metalul, fiind mai greu, e atras de gravitație în nucleu, în timp ce silicații, fiind mai ușori, migrează spre suprafață. Acest proces începe lent, mici bucăți de fier topit și alte metale se scurg în pâraie spre nucleu și se solidifică. Dar pâraiele se transformă repede în râuri, apoi în fluvii, fenomen numit uneori „catastrofa fierului”.

De ce se solidifică metalul în centru? De fapt, nu știm dacă nucleul e solid sau e o plasmă cu densitatea caracteristică unui solid. Dacă e solid, ar fi greu de înțeles de ce rămâne așa, având în vedere că temperaturile din nucleul Pământului actual sunt probabil de ordinul a 5700K. Să nu uităm însă că acolo și presiunea e mult mai ridicată.

Temperaturile tranzițiilor de fază, cum sunt topirea (din solid în lichid) și fierberea (din lichid în gaz), nu sunt fixe, ci depind de condițiile mediului, în special de presiune. Apa fierbe la 100 °C (373K) în bucătărie, la presiunea atmosferică normală, dar fierbe la 70 °C (343 K) pe vârful Muntelui Everest, la 8800 de metri altitudine, unde presiunea

aerului este cu 70% mai mică decât în bucătărie. Pe măsură ce presiunea crește, crește și punctul de fierbere.

Același lucru e valabil pentru punctele de topire (cu unele excepții notabile). Acestea pot crește cu 5–10 K pentru fiecare 1000 de bari de presiune.[130] La o adâncime de doar 120 km, presiunea este de aproximativ 40.000 de bari, iar temperaturile de topire a rocilor pot ajunge cu 400 K mai ridicate decât la suprafață. La adâncimi de peste 5000 km, presiunea estimată de 3,3–3,6 *milioane de* bari este atât de mare încât nici măcar o temperatură de 5700 K nu mai e suficientă pentru a menține metalul în stare topită.

Interiorul Pământului se transformă dintr-un amestec aleatoriu și amorf de silicați și oxizi de metal într-o structură stratificată. Se formează un nucleu intern, compus în mare parte (80%) din fier solid și alte metale, cum e nichelul, care în prezent are raza de circa 1220 km. Acesta e înconjurat de un nucleu extern, un ocean de fier topit, cu grosimea de 2266 km. Deasupra se află mantaua compusă din roci de silicați solide (relativ ductile), cu grosimea de circa 2900 km. De unde știm toate astea? Țineți cont că dovezile pe care le prezint în rezumat se referă la Pământul actual, nu la proto–Pământ sau la Pământul de la începuturile sistemului solar. Vom vedea că nu știm cu precizie câtă masă a acumulat Pământul în această etapă, dar e probabil să fi avut o masă mai mică decât în prezent.

Granițele straturilor produse prin diferențierea planetară în interiorul Pământului sunt marcate prin schimbări bruște – sau „discontinuități” – ale *densităților* materialelor care alcătuiesc fiecare strat. Indicii privind aceste discontinuități sunt date de studiile seismologice ale undelor de șoc provocate de cutremure, care străbat interiorul Pământului. Ele sunt de două tipuri – unde longitudinale, de compresie sau de presiune (unde–P), în care materia prin care acestea se deplasează e dislocată înainte și înapoi în direcția de propagare a undei, și unde transversale sau de forfecare (unde–S), în care materia e dislocată perpendicular (în sus și în jos) pe această direcție. Undele–P se propagă mai repede și sunt detectate mai devreme.

Ambele tipuri de unde se propagă cu viteze determinate de densitatea materiei prin care trec. Se dovedește că undele–S nu pot traversa

lichide (sau o fac diminuându–şi drastic amplitudinea sau „înălţimea”), aşa că nu pătrund mult nucleul extern. Undele–S produse de un cutremur într-o parte a Pământului nu vor fi detectate în cealaltă parte, spre deosebire de undele–P, care trec prin nucleu. Studiind decalajele temporale ale undelor de şoc, geologii au putut alcătui o imagine a structurii interne a Pământului.

Discontinuitatea care semnalează modificarea densităţii la limita dintre nucleul intern şi cel extern a fost descoperită de seismologul danez Inge Lehmann în 1936. Unele texte o numesc discontinuitate Lehmann, deşi acest nume e de regulă folosit pentru altă discontinuitate, care apare imediat sub scoarţa continentală a Pământului şi a fost descoperită de Lehmann în 1961. În figura 51 am numit discontinuitatea dintre nucleul intern şi cel extern „graniţa nucleului intern”.

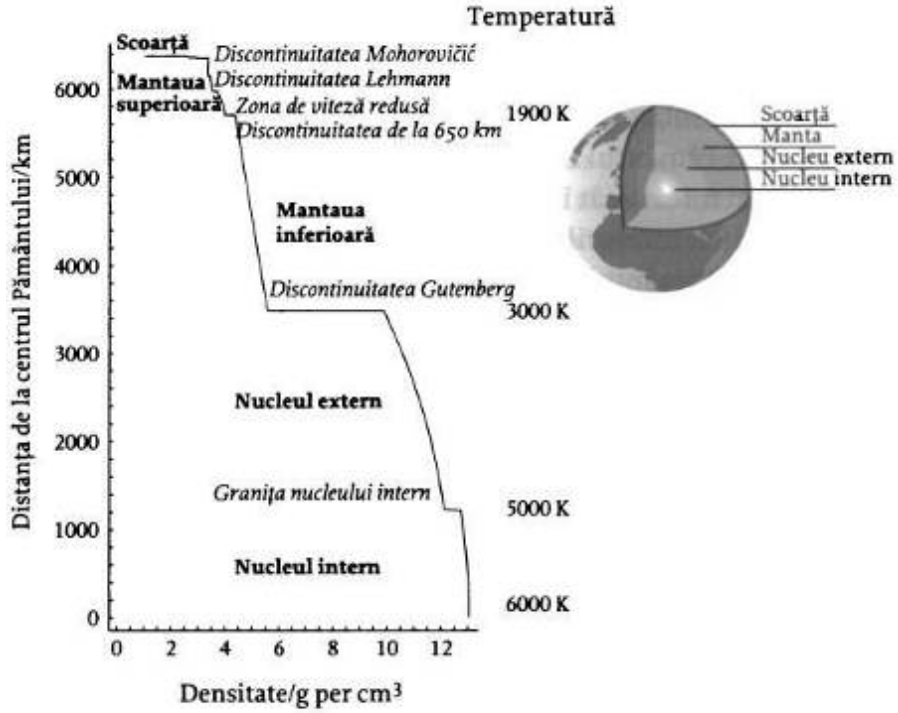


Figura 51. *Densitatea materiei din care e alcătuit Pământul creşte cu adâncimea. Graniţele dintre straturi sunt marcate de schimbări abrupte ale densităţii, care pot fi detectate în tiparele şi decalajele temporale ale undelor de şoc ale cutremurelor înregistrate de seismografe. Desenul din dreapta prezintă distribuţia nucleului intern, nucleului extern, mantalei şi scoarţei.*

Cea mai clară discontinuitate apare la graniţa dintre nucleul extern şi manta, unde densitatea creşte spectaculos de la 6 la 10 grame pe

centimetru cub. Nu e de mirare că a fost descoperită ceva mai devreme, în 1912, de seismologul american de origine germană Beno Gutenberg, deşi natura nucleului extern a fost stabilită abia în 1926. Este o graniță extrem de abruptă, numită discontinuitatea Gutenberg.

Procesul de diferențiere planetară are loc încă de când proto–Pământul acumulează masă, şi se declanşează imediat ce e trecut un prag critic legat de masă, densitate şi gravitaţie. Cât de repede se formează nucleul? Pentru a răspunde la întrebare, trebuie să revenim la izotopii radioactivi cu timp de viață scurt, care slujesc drept un fel de ceas intern.

Izotopul radioactiv al elementului hafniu (^{l82}Hf) are un timp de înjumătățire de circa 9 milioane de ani şi se dezintegrează în tungsten, ^{182}W. Practic, toți atomii de ^{l82}Hf prezenți inițial în interiorul Pământului în formare se vor fi dezintegrat în 100 de milioane de ani. Hafniul are o afinitate chimică mai mare pentru silicații din manta, în timp ce tungstenul preferă fierul şi nichelul din nucleu. Urmele amestecului de hafniu şi tungsten prezent în masele de silicați la formarea Pământului se vor separa ca rezultat al diferențierii planetare. Tungstenul se va scufunda în nucleu, iar hafniul va rămâne în manta.

Dacă acest proces durează mai mult de 100 de milioane de ani, atunci izotopul ^{l82}Hf va fi dispărut înainte ca nucleul şi mantaua să se fi separat. Ne-am aştepta deci ca raportul dintre ^{l82}W şi un izotop de referință (^{l83}W) să fie acelaşi în nucleu şi în manta, dar şi în meteoriții condritici care vor pluti prin sistemul solar în următorii 4,6 miliarde de ani, fără a fi vreodată expuşi la temperaturile şi presiunile asociate cu diferențierea planetară.

Dacă însă nucleul se formează mai repede, tungstenul migrează mai repede spre nucleu, lăsând hafniul în manta şi mărind astfel raportul dintre hafniu şi tungsten din manta. Când ^{l82}Hf se dezintegrează în manta, aceasta se îmbogățește cu ^{182}W, iar raportul ^{182}W/^{183}W crește. Îmbogățirea cu ^{l82}W în raport cu ^{l83}W, măsurată în silicații ajunşi la suprafața Pământului, arată că nucleul s-a format în aproximativ 34 de milioane de ani. Studii izotopice recente dau pentru formarea nucleului

intervalul 27,5–38 milioane de ani, iar pentru diferențierea silicaților (deci formarea mantalei) intervalul 38–75 milioane de ani.

Mantaua și scoarța

Mantaua e alcătuită dintr-o mulțime de substanțe chimice în amestecuri complexe, iar tranzițiile de fază nu mai depind doar de trecerea unor frontiere de temperatură sau presiune simplu de definit. Mantaua se topește într-un interval larg de temperaturi și presiuni, motiv pentru care compoziția ei s-a dovedit greu de stabilit cu precizie. Știm că mantaua e separată de o altă discontinuitate, aflată la o adâncime de 650 km (în figura 51 e numită „discontinuitatea de la 650 km"). Deasupra acestei discontinuități se află mantaua superioară, dedesubt – mantaua inferioară.

Se crede că mantaua inferioară e alcătuită în principal din perovskite de siliciu cu fier și magneziu ($MgSiO_3$ și $FeSiO_3$, feropericlase (numite și magneziowustite, un amestec de oxizi de magneziu și fier – MgO, FeO), perovskite de siliciu cu calciu ($CaSiO_3$), corundume sau alumine (oxid de aluminiu, Al_2O_3) și multe altele. Aceste minerale se combină pentru a da profilul caracteristic al densității mantalei inferioare, care variază între 4,5 și 5,5 grame pe centimetru cub.

În mantaua superioară, imediat deasupra discontinuității de la 650 km, se află o regiune în care viteza undelor seismice e mică, numită „zona de viteză redusă" (*Low Velocity Zone* – LVZ), identificată de Gutenberg în 1959. Aceasta se întinde în adâncime între 410 și 650 km. Deasupra ei, la adâncimea de 220 km, se află discontinuitatea Lehmann, care nu e globală, ci se găsește doar sub scoarța continentală. Se crede că aceste discontinuități apar din modificări fizice, nu din diferențe chimice între diversele straturi ale mantalei superioare.

Compoziția mantalei superioare e ceva mai ușor de identificat, deoarece există locuri pe Pământ unde a penetrat deasupra scoarței, fiind accesibilă. În mare parte, e alcătuită dintr-o rocă vulcanică macrogranulară numită peridotit, formată în principal din minerale de olivină (un silicat de magneziu și fier) și piroxeni (silicați conținând calciu, magneziu și fier). Olivina reprezintă aproximativ 55% din

conţinutul de minereu, piroxenii 35%, iar restul de 10% sunt oxizi de calciu şi aluminiu.

Trebuie din nou să renunţăm la intuiţia bazată pe experienţa de la suprafaţa Pământului, unde presiunea atmosferică rămâne aproape constantă. Geologii cred că la această adâncime mantaua superioară este parţial topită, ca rezultat al fenomenului de *topire prin decompresie.* Ideea că un material se topeşte când temperatura scade e contraintuitivă, însă la fel ca în cazul fierului topit din nucleul extern, rocile din LVZ se află la o temperatură mai joasă, dar se topesc parţial pentru că presiunea e mai scăzută. Topirea parţială face ca mantaua să fie destul de plastică şi, după cum vom vedea, capabilă să întreţină curenţi de convecţie care deplasează porţiuni din scoarţă.

Ajungem în fine la scoarţa Pământului. Topirea parţială a mantalei superioare determină o separare a substanţelor din care e compusă, mineralele cu densităţi mici aflându-se deasupra. Separarea scoarţei de mantaua superioară e marcată şi de o altă discontinuitate, legată de undele seismice, numită după seismologul croat Andrija Mohorovicic, menţionată uneori şi ca „discontinuitate Moho". Se află la 5–10 km sub fundul oceanic şi la 20–90 km sub zonele continentale.

Cum între fundul oceanic şi discontinuitatea Moho sunt doar 5–10 km, deducem că scoarţa oceanică e destul de subţire. Ea e formată în mare parte din bazalt, o rocă vulcanică, ceea ce înseamnă că s-a format prin extruziunea şi răcirea magmei sau lavei topite ori semitopite. Poate conţine o gamă largă de minerale, însă de obicei constă din anortit (un tip de feldspat), piroxeni şi minereu de fier. Uneori poate conţine olivină şi cuarţ (SiO_2). Scoarţa de sub oceanele actuale s-a format relativ recent, în ultimele sute de milioane de ani, în mare parte prin ridicarea magmei în rifturile medio–oceanice (vom vorbi în curând despre ele). Bazaltul produs de Pământul primitiv s-a format într-un alt mediu, şi probabil că a avut o chimie diferită.

Scoarţa continentală e mult mai veche. S-a format cam în acelaşi fel, dar implică o serie de cicluri topire–răcire. Magma care se răceşte produce bazalt. Când e reîncălzit, bazaltul se topeşte şi conduce la o nouă separare chimică, iar la răcire se transformă în granit, un amestec de cuarţ, mică (foi de silicaţi) şi feldspat de potasiu ($KAl_2Si_2O_8$).

Reîncălzirea granitului nu conduce la o altă separare chimică, deci granitul e produsul final al oricărui număr de cicluri topire–răcire.

Departe de a fi atât de simplă pe cât o sugerează această descriere, formarea scoarţei continentale e în continuare dezbătută de geologi. E greu de înțeles natura și semnificația procesului de separare chimică cunoscând doar compoziția mineralelor din mantaua superioară și din scoarță. Amestecul e prea complex, dar putem simplifica puțin lucrurile reducând compoziția chimică a acestor straturi la o serie de „cărămizi" elementare. Compoziția e dominată de doar cinci oxizi: de siliciu (SiO_2), de magneziu (MgO), de fier (FeO), de aluminiu (Al_2O_3) și de calciu (CaO). Desigur, unele dintre aceste substanțe există separat în peridotitul din mantaua superioară, în bazaltul din scoarța oceanică și în granitul din scoarța continentală. La acestea se adaugă silicații mai complecși. De exemplu, mineralul diopsid e un silicat bogat în magneziu și calciu, cu formula $MgCaSiO_4$, pe care îl putem privi ca SiO_2 plus MgO plus CaO.

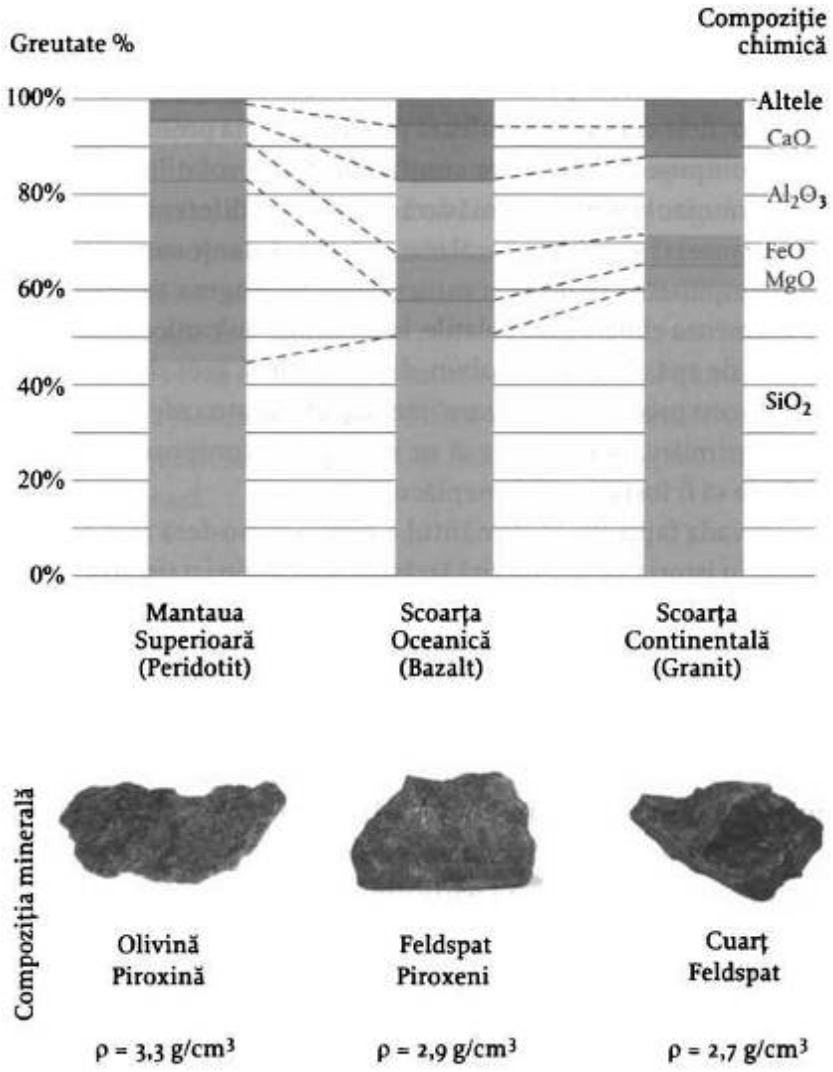


Figura 52. *Mantaua superioară, scoarța oceanică și scoarța continentală sunt compuse în mare parte din trei tipuri de rocă: peridotit, bazalt și granit. Aceste roci au diferite compoziții, principalele minerale fiind prezentate aici. Însă acestea sunt amestecuri complexe de substanțe chimice și, pentru a înțelege ce se întâmplă, e util să urmărim schimbările în compoziția chimică. Dreptunghiurile din grafic prezintă proporția (procentual, în greutate) a cinci oxizi pentru fiecare tip de rocă. Pe măsură ce proporțiile se modifică, densitatea rocilor (ρ) scade.*

Acum consecințele separării chimice sunt mai ușor de vizualizat. Figura 52 prezintă compoziția chimică pentru peridotit, bazalt și granit. Peridotitul se topește, se separă, se răcește și produce bazalt, care e mai bogat în SiO_2 și Al_2O_3, dar mai sărac în MgO. Densitatea medie scade de la 3,3 la 2,9 grame pe centimetru cub, iar bazaltul, care e mai puțin dens, plutește la suprafață. Topirea, separarea și răcirea ulterioară a bazaltului produce granitul scoarței continentale, care e și mai bogat în

SiO_2 şi Al_2O_3, dar şi mai sărac atât în FeO, cât şi în MgO. Densitatea medie scade până la 2,7 grame pe centimetru cub, iar granitul se ridică la suprafaţă.

Atmosfera

Mai există un strat pe care trebuie să-l luăm în considerare. Planetezimalele care se acumulează pentru a forma proto–Pământul sunt compuse din roci care conţin substanţe volatile, cum ar fi apă, amoniac şi metan. Pe măsură ce procesul diferenţierii planetare avansează şi rocile se încălzesc, aceste substanţe sunt eliberate. Descompunerea chimică a mineralelor în magma topită poate de asemenea elibera gaze volatile, iar erupţiile vulcanice eliberează vapori de apă, dioxid de carbon, dioxid de sulf, azot şi multe alte gaze. Acest proces de „degazare" creează prima atmosferă a Pământului primitiv. Putem doar să ne închipuim compoziţia ei, care trebuie să fi fost destul de neplăcută.

Dovada faptului că Pământul a avut o atmosferă atât de timpuriu în istoria sa ne e oferită iarăşi de un izotop cu timp de viaţă scurt. Un izotop al iodului, ^{129}I, se dezintegrează pentru a produce ^{129}Xe, cu un timp de înjumătăţire de 16 milioane de ani. Xenonul este un gaz nobil şi are opt izotopi care sunt stabili sau au un timp de înjumătăţire foarte lung. Nu prea intră în reacţii chimice, preferând să evadeze în atmosferă decât să rămână captiv în structurile rocilor. Pe de altă parte, iodul se simte ca acasă în manta.

Dacă atmosfera s-a format lent, să zicem în 100 de milioane de ani sau mai mult, mare parte din ^{129}I se va fi dezintegrat, permiţând izotopului ^{129}Xe produs să treacă din manta în atmosferă. Ne-am aştepta să găsim foarte puţin xenon în manta, dar pentru că a trecut suficient timp, ar trebui să nu existe diferenţe în raportul dintre ^{129}Xe şi alţi izotopi stabili ai xenonului. Dacă însă atmosfera s-a format rapid, o mare parte din xenon a intrat în atmosferă *înainte* ca întreaga cantitate de ^{129}I să se fi dezintegrat. Când ^{129}I se dezintegrează în manta, el îmbogăţeşte mantaua cu ^{129}Xe în comparaţie cu atmosfera. Rapoartele dintre izotopii de xenon măsurate în 1983 arată că atmosfera şi mantaua s-au

separat în circa 30 de milioane de ani, aproximativ același interval cu cel în care s-a separat nucleul de manta.

Să recapitulăm. Au trecut vreo 90 de milioane de ani de când Pământul a început să se condenseze în discul protoplanetar al Soarelui. O atmosferă toxică înconjoară suprafața Pământului primitiv, tulburată constant de activitatea vulcanică. Un ocean de magmă fierbinte strălucind roșiatic împrăștie vapori denși de silicați. Soarele, aflat la începutul călătoriei de-a lungul șirului principal, produce o lumină palidă, care nu poate străpunge ceața. Planeta e izbită necontenit de meteoriți mari, pe măsură ce discul se debarasează de reziduuri.

Bine ați venit în *Hadean*, primul eon geologic al Pământului, numit după Hades, zeul grec al infernului. Acest Pământ primitiv e nepromițător, inospitalier și de nelocuit. Iar ce e mai rău abia acum urmează.

Luna

Pământul primitiv nu are satelit natural. Există în general trei căi prin care o planetă poate dobândi unul sau mai mulți sateliți naturali. Ei se pot forma odată cu planeta, condensându-se în același timp cu ea din norul de gaz și praf, și împărțind aceeași traiectorie orbitală în jurul proto–Soarelui. Se mai poate și ca obiecte aflate prea aproape de câmpul gravitațional al planetei să fie capturate și să devină sateliți. Sau, în condiții favorabile, o lună poate apărea din impactul oblic între două planete. Acest ultim mecanism, *ipoteza impactului gigantic*, e propus pentru a explica felul în care Pământul și-a dobândit satelitul natural. Să vedem cum funcționează.

Pământul primitiv are un vecin de dimensiunea lui Marte, cu o orbită periculos de apropiată. În 2000, vecinul a fost botezat Theia, după una dintre titanidele din mitologia greacă, cea care a născut–o pe Selena, zeița Lunii. Nu cunoaștem împrejurările care au modificat traiectoriile lor orbitale, dar la circa 90 de milioane de ani după formarea sistemului solar, Pământul și Theia s-au ciocnit.[131]

Desigur, în procesul de acreție, proto–Pământul a fost lovit de corpuri din ce în ce mai mari și a supraviețuit, dar de data asta era vorba de ciocnirea între două planete. Probabil că diferențierea planetară produsese deja în ambele nucleu, manta, scoarță și atmosferă. Dacă

impactul ar fi fost frontal, pesemne că n-ar fi existat supraviețuitori, ci o mare cantitate de resturi împrăștiate, din care s-ar fi putut naște în cele din urmă una sau mai multe planete.

Din fericire, a fost o ciocnire oblică. Simulările pe calculator publicate în 2004 au explorat diferite scenarii de ciocnire și s-au concentrat asupra celor care produceau o lună de dimensiunea potrivită, cu un mic nucleu de fier, în acord cu ceea ce știm azi despre Lună.[132] Aceste simulări sugerează că Theia a izbit Pământul primitiv sub un unghi de 45^0,[133] cu o viteză relativă de 4 km/s (figura 53). Deși oblică, ciocnirea a avut efecte devastatoare, ceea ce ne face să înțelegem că, la scară planetară, „acreția" poate fi un proces extrem de violent și destructiv.

Theia e spulberată. Nucleul de fier e sfâșiat și atras spre interiorul Pământului pentru a se contopi cu nucleul lui. O mare parte din mantaua Theiei e absorbită de mantaua Pământului, dar partea opusă zonei de impact e încălzită mai puțin de ciocnire și e azvârlită în spațiu. Se crede că Theia avea o masă de 0,11–0,14 $M_{\oplus}$, iar acum e ejectată mantaua ei având 0,018–0,026 $M_{\oplus}$, din care 70% provine din partea îndepărtată a Theiei. Între 10% și 30% din această masă ejectată sunt vapori. Atmosfera care se formase în jurul Pământului primitiv a dispărut. Aproximativ jumătate din materialul ejectat e pierdut. Restul este supus procesului de acreție și formează Luna actuală, cu o masă de 0,012 $M_{\oplus}$.

Luna e alcătuită în principal din manta. Cantitatea mică de fier prezentă în materialul ejectat prin ciocnire migrează acum spre centru, ca rezultat al diferențierii planetare. Acesta formează un mic nucleu intern de fier solid, cu o rază de doar 240 km, înconjurat de un nucleu extern din fier lichid cu o grosime de 60 km. Compoziția chimică a scoarței Lunii e oarecum diferită de compoziția scoarței oceanice și continentale a Pământului, prezentată în figura 52, după cum e de așteptat, odată ce 70% din conținutul ei provine de la Theia. Desigur, nu există oceane pe Lună, dar există o diferență de compoziție între „mările lunare" și „munții lunari".

Mările lunare sunt peticele întunecate vizibile pe suprafața Lunii. Ele sunt compuse în principal din bazalt solidificat provenind din vechile

fluvii de magmă, mai bogate în FeO și dioxid de titan (TiO2) decât crusta oceanică a Pământului. Par să aibă o

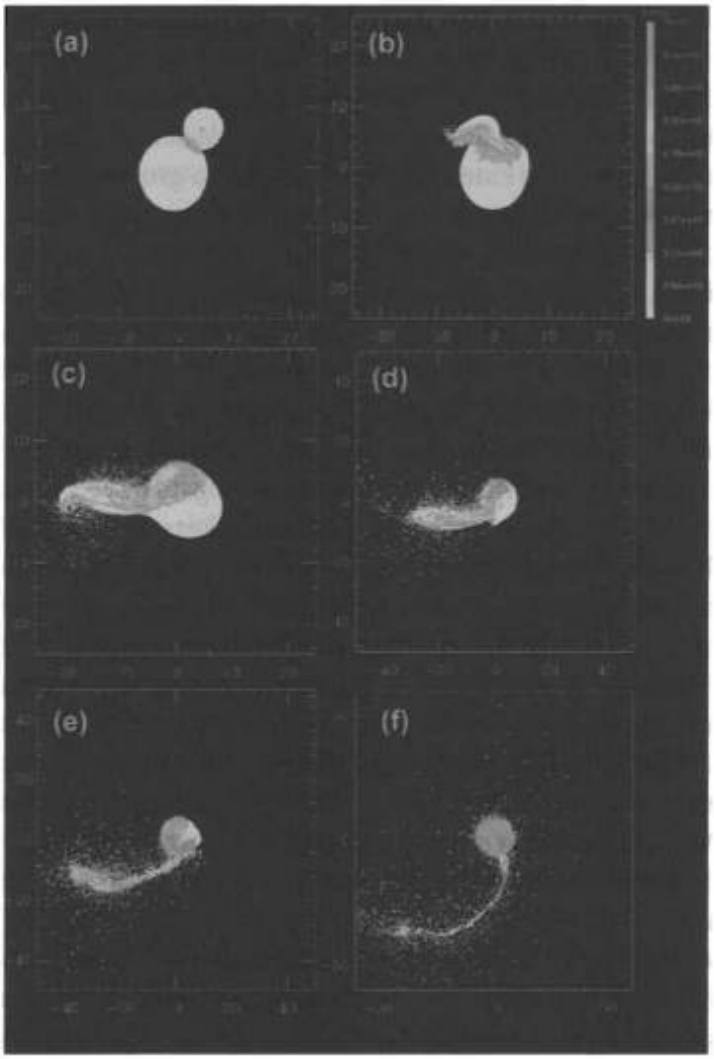


Figura 53. *Simularea pe calculator a unui impact în urma căruia se formează o lună, propusă în 2004 de Robin M. Canup de la Southwest Research Institute, din Boulder, Colorado. Aceste „instantanee" prezintă desfășurarea ciocnirii și efectele ei la diferite momente după impact. (a) 6,5 minute; (b) 19,4 minute; (c) 51,8 minute; (d) 84,1 minute; (e) 129,4 minute; (f) 291,1 minute. Observați că scara distanțelor (în mii de kilometri) se modifică între cadrele (c), (d), (e) și (f). Temperaturile, de la 2000 la 7000 K, sunt codificate prin culori. Adaptat cu permisiunea lui Robin M. Canup,* **Icarus** *168 (2004), p. 433.*

vechime de 3,1–3,9 miliarde de ani, deci cu 600–1400 de milioane de ani *mai tinere* decât Luna însăși. După cum ne sugerează și numele, munții lunari se înalță deasupra mărilor, la fel cum continentele Pământului se înalță deasupra fundului oceanelor. Zonele muntoase sunt mult mai bogate în MgO, Al_2O_3 și CaO decât scoarța continentală a

Pământului şi par compuse în mare măsură din anortozit, o rocă alcătuită în principal din anortit, $CaAl_2Si_2O_8$, un minereu bogat în calciu. Această rocă e mult mai veche decât bazaltul din mări, având vârsta de circa 4,4 miliarde de ani.

Ceea ce ştim despre geologia Lunii provine din analiza celor 390 de kilograme de rocă selenară aduse pe Pământ de astronauţii misiunilor Apolo, care nu puteau aseleniza decât în puţinele locuri prielnice, deci eşantioanele sunt departe de a fi reprezentative. Totuşi, asemănările – şi deosebirile – faţă de geologia Pământului sunt frapante. Astronauţii misiunii Apolo 15 James Irwin şi David Scott au cules o mostră de anortozit despre care s-a crezut iniţial că aparţine scoarţei primordiale a Lunii. Mostra a fost botezată „roca Genezei". Analize ulterioare au arătat că, deşi foarte veche, e totuşi cu vreo 400 de milioane de ani mai tânără decât Luna şi s-a format după solidificarea primei scoarţe a Lunii. Aceste eşantioane au permis geofizicienilor să reconstituie o istorie plauzibilă a Lunii. La scurt timp după formare, Luna e acoperită de un imens ocean de magmă fierbinte. Când se răceşte, anortitul cristalizează şi pluteşte deasupra, generând o scoarţă subţire de anortozit, iar olivina şi piroxenii se scufundă în manta. Bazaltul închis la culoare al mărilor selenare se formează mai târziu, în urma diferenţierii planetare ulterioare şi ieşirii la suprafaţă a magmei din manta.

Trebuie explicat de ce munţii lunari sunt compuşi în mare parte din anortozit, pe când scoarţa continentală a Pământului e compusă din granit. Legile simple ale fizicii ne oferă răspunsul. Pe măsură ce oceanul de magmă selenar se răceşte, anortozitul cristalizează. Dar fiindcă Luna e mult mai mică, câmpul ei gravitaţional e mult mai slab. Diferenţele de presiune dintre suprafaţă şi nucleu sunt deci mult mai mici decât în cazul Pământului, astfel încât anortozitul e stabil la adâncimi mult mai mari pe Lună decât pe Pământ. Se formează o scoarţă groasă de anortozit. O asemenea scoarţă formată pe Pământ ar fi mai subţire, căci anortitul devine instabil la presiunile generate la mai puţin de 40 km adâncime. Această scoarţă subţire e expusă impactului meteoriţilor şi fenomenelor fizico–chimice pe care Luna nu le va cunoaşte niciodată şi pe care noi le numim *climă.*

Există însă și aspecte nelămurite. Tiparul mărilor întunecate și zonelor muntoase mai deschise la culoare e bine cunoscut oricui a privit Luna, dar de pe Pământ vedem doar partea apropiată a Lunii. În partea îndepărtată a Lunii practic nu există mări (figura 54). Cum e posibil?

Iată o posibilă explicație. În simulări ale unui impact gigantic efectuate în 2011, materialul ejectat formează două luni, iar cea de-a doua, mult mai mică, are o orbită care devine instabilă după câteva zeci de milioane de ani și se prăbușește încet în partea îndepărtată a Lunii. Aceasta ar explica de ce partea îndepărtată e atât de diferită, dominată de zone muntoase, cu o scoarță cu circa 50 km mai groasă decât scoarța din partea apropiată, vizibilă.

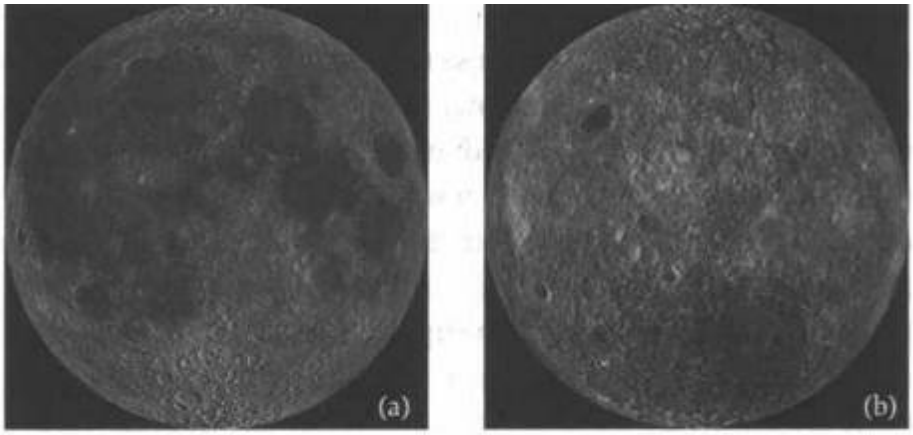


Figura 54. *Partea apropiată a Lunii (a) are „mări", care apar ca petice întunecate, și zone muntoase, care sunt mai deschise la culoare. Dimpotrivă, suprafața părții îndepărtate a Lunii (b) prezintă doar zone muntoase și are o scoarță mult mai groasă.*

Asemănările geologice frapante între Pământ și Lună implică o relație intimă care nu e ușor de explicat prin ipoteza capturii. Spre deosebire de rocile de pe Pământ, rocile colectate de pe suprafața Lunii, lăsând la o parte ciocnirile cu meteoriți, au rămas în mare parte neschimbate de la formarea Lunii. Dacă Pământul și Luna s-au condensat simultan, este de așteptat ca rocile selenare să aibă o vârstă asemănătoare cu cele acele meteoriților condritici. Dar există o diferență de vârstă. Vă reamintesc din capitolul anterior că meteoriții condritici au o vechime de 4567,2±0,6 milioane de ani. Analiza eșantioanelor de rocă selenară arată că vârsta Lunii este de 4430–4520 milioane de ani, deci avem o diferență de 47–137 milioane de ani. Nu încape îndoială că Luna a apărut mai târziu.

Numai că asemănările dintre Pământ şi Lună sunt de fapt *prea* frapante. Analizele izotopice (de pildă pentru ^{l6}O, ^{17}O şi ^{l8}O) dezvăluie rapoarte *identice* între izotopi la rocile selenare şi la cele terestre. La prima vedere, pare o dovadă convingătoare în favoarea ipotezei impactului gigantic. Totuşi, rapoartele izotopilor din meteoriţi sunt puţin diferite şi putem anticipa că diferitele corpuri planetare au, de asemenea, diferite rapoarte ale izotopilor.

Dacă circa 70% din Lună s-a format din mantaua Theiei, atunci rapoartele identice ale izotopilor sunt bizare. Evident, Theia ar fi putut avea aceeaşi compoziţie ca Pământul primitiv, cu aceleaşi rapoarte ale izotopilor, dar coincidenţa ar fi mai mare decât sunt în genere dispuşi să accepte oamenii de ştiinţă. Au fost găsite diferite explicaţii pentru aceste similarităţi, implicând o perioadă de amestec turbulent de materiale în sistemul Pământ-lună la scurt timp după impact. Într-un scenariu, Pământul şi Luna împart o atmosferă comună de plasmă metalică formând o „punte" între cele două şi permiţând schimbul de material până la echilibrare.

Există însă şi alte probleme pe care ipoteza iniţială a impactului gigantic nu le poate explica. O variantă ulterioară a acestei ipoteze, publicată în 2012, avansează ideea că două planete de dimensiuni asemănătoare (ambele cu mase puţin mai mari de 0,5 $M_{\oplus}$) suferă o ciocnire oblică la viteză mică.[134] Ar fi o ciocnire oarecum „lipicioasă", planetele ar ricoşa una din alta şi s-ar ciocni iarăşi. Nucleele lor de fier s-ar contopi, mantalele s-ar amesteca şi s-ar echilibra. Pământul nou–format, învârtindu-se acum foarte rapid în jurul axei proprii, ar genera braţe spirale de manta lichidă, iar în cele din urmă, braţele s-ar contopi, dând naştere Lunii.

Dacă aşa au stat lucrurile, atunci n-a existat un Pământ primitiv ca atare, ci Pământul a apărut din fuziunea a două corpuri planetare. Din diverse motive, în 2010 unii geofizicieni au propus ca Pământul primitiv să fie rebotezat Tellus, după vechea zeiţă romană a Pământului.[135] Să folosim deci şi noi acest nume. Ne putem imagina că Tellus şi Theia se formează cu mase asemănătoare şi orbite riscant de apropiate una de alta. Ele suferă o ciocnire oblică, din care, într-un act final de acreţie planetară, se nasc Pământul şi Luna.

Acest tip de scenariu de ciocnire a fost respins în primele simulări, fiindcă producea un sistem Pământ-lună cu un moment cinetic prea mare. Studii ulterioare au identificat totuşi posibilitatea unei rezonanţe orbitale – numită rezonanţă de „evecţiune”[136] – între orbita Pământului în jurul Soarelui şi orbita Lunii în jurul Pământului, care poate încetini mult rotaţia Pământului în jurul axei proprii.[137] Posibilitatea acestei rezonanţe a lărgit şansele scenariilor pe bază de impact de a genera ceva asemănător cu sistemul Pământ-lună din prezent.

Indiferent de aceste detalii, fapt este că Pământul şi-a dobândit Luna, sau a apărut odată cu ea, la circa 90 de milioane de ani după ce sistemul solar a început să se formeze. Dacă într-adevăr a avut loc un impact gigantic, urmele trecutului au fost şterse. Pământul nu porneşte de la zero, căci nucleul şi mantaua sunt deja prezente în formele lor noi, extinse, dar se petrece probabil încă o diferenţiere, iar Pământul are acum nevoie de o nouă scoarţă şi o nouă atmosferă.

Impactul gigantic a avut şi altă consecinţă. Pământul are axa înclinată şi se învârte în jurul ei mai rapid decât în prezent. Putem emite doar ipoteze, dar s-ar părea că în acest moment din istoria Pământului, o zi durează doar vreo zece ore. Dacă Pământul are cam aceeaşi orbită în jurul Soarelui ca în prezent, atunci un an are aproximativ 880 de zile. Şi lunile sunt mult mai scurte, fiindcă Luna se roteşte în jurul Pământului mult mai repede. Ea se află mult mai aproape. Pe când Pământul îşi reface atmosfera prin degazare şi activitate vulcanică, pe cer poate fi văzută o Lună de două ori mai mare decât azi.

Pământul şi Luna sunt acum înlănţuite într-o îmbrăţişare gravitaţională irezistibilă. Pământul transferă Lunii moment cinetic, împingându–i orbita mai departe. Dovada acestui schimb de energie se găseşte în coralii fosili. Cu vreo 360 de milioane de ani în urmă, ziua era mai scurtă, un an având aproximativ 400 de zile. Acest fapt e confirmat de o dovadă mai recentă. La prima aselenizare din 1969, Neil Armstrong şi Buzz Aldrin au lăsat o mică oglindă laser pe suprafaţa Lunii. Cu ajutorul pulsurilor laser transmise de pe Pământ şi reflectate de oglindă s-a putut măsura cu mare precizie distanţa Pământ-lună. În 45 de ani, Luna s-a depărtat de Pământ într-un ritm de aproape 4 centimetri pe an.

Apa, oceanul și clima

Atmosfera Pământului renovat (sau proaspăt format) e produsă în câteva milioane de ani prin degazare. Tânărul Soare e încă plăpând, producând doar 70% din lumina și căldura pe care le produce acum. Odată ce suprafața se calmează și fluxurile de magmă se răcesc, ne-am aștepta ca Pământul să fie un loc destul de răcoros. Vaporii de apă purtați în atmosferă împreună cu alte gaze alcătuiesc norii. Apa din acești nori se condensează provocând ploi (sau ninsori) la fel ca azi. Apa se acumulează pentru a forma oceane. Pe un Pământ rece, oceanele vor îngheța.

Există însă dovezi că Pământul primitiv era mult mai cald, suficient de cald pentru ca apa oceanelor să rămână lichidă. Cele mai vechi minerale găsite pe suprafața Pământului sunt micile cristale de zircon formate din silicați de zirconiu ($ZrSiO_4$) provenind de la Jack Hills, în vestul Australiei, la vreo 800 km nord de Perth. S-a stabilit că au vârsta de 4404 milioane de ani, plus/minus 8 milioane de ani, și sunt înglobate în roci mult mai tinere.[138] Aceste cristale sunt deci cu 26–116 milioane de ani mai tinere decât Luna. Ele sunt foarte interesante prin faptul că s-au format probabil în granitul topit, iar granitul, după cum știm, indică prezența scoarței continentale. Existența acestor vechi cristale de zircon arată că Pământul își formase deja o scoarță continentală la mai puțin de 100 de milioane de ani după impactul care a dat naștere Lunii.

Și mai e ceva. Acestea sunt cristale de zircon „detritic", granule minerale formate din rocă printr-un proces de dezagregare și depunere sedimentară. Sedimentare? Rapoartele izotopilor de oxigen din cristalele de zircon indică existența apei lichide pe suprafața Pământului la momentul formării lor. Nu cunoaștem niciun proces chimic care să explice formarea lor în scoarță sau în manta. Aceasta e cea mai veche dovadă privind apa lichidă, deci și clima pe Pământ.

Se ridică astfel o problemă pe care geofizicienii o numesc „paradoxul tânărului Soare palid". După ce oceanele de magmă s-au răcit și activitatea vulcanică a scăzut, cum a reușit tânărul Pământ să fie atât de cald? O posibilă explicație ar fi că atmosfera a oferit un strat gros de dioxid de carbon, metan și alte gaze „cu efect de seră", care au capturat slabele raze ale Soarelui, ridicând temperatura de la suprafața planetei.

Asemenea gaze sunt transparente pentru lumina vizibilă, care trece prin atmosferă și încălzește suprafața. Însă energia radiată de suprafață sub formă de radiație infraroșie (căldură) e absorbită de aceste gaze și reemisă în toate părțile, inclusiv înapoi către suprafață. Ceva asemănător se întâmplă pe Venus, care a avut parte de un violent efect de seră, iar ca urmare, la suprafață are temperatura de 735 K. Există și alte posibile explicații, dar aceea a unui timpuriu efect de seră pe Pământ pare cea mai plauzibilă.

Magnetosfera

Tânărul Pământ are atmosferă și oceane cu apă lichidă, pesemne și o climă moderată. Nu e încă Pământul pe care îl cunoaștem, dar e pe cale de a deveni locuibil. Îi mai lipsește un singur element. Soarele nu e atât de inofensiv pe cât pare. Pe lângă căldura și lumina necesare vieții, el emite un flux periculos de particule încărcate – majoritatea electroni și protoni – numit vânt solar. Acest vânt poate spulbera atmosfera unei planete tinere. Marte, care n-a fost niciodată suficient de mare pentru a–și păstra o atmosferă substanțială, a pierdut puținul pe care îl avea din cauza vântului solar. Deși se poate să fi existat apă lichidă pe Marte într-o etapă timpurie din istoria lui (sunt unele dovezi în acest sens), pierderea atmosferei a însemnat și pierderea apei de pe suprafața lui. De aceea Marte e un loc arid și inospitalier.

Ce face ca Pământul să fie diferit e faptul că posedă un câmp magnetic care deviază mult din vântul solar, protejând fragila chimie (și, în ultimă instanță, biologie) care se poate dezvolta pe suprafața lui ori în oceane. Câmpul magnetic este rezultatul curenților electrici stabiliți în fluidul din nucleul extern. Fiind compus din fier, nucleul extern e bun conducător de electricitate. În el are loc convecția – căldura transportată din nucleul intern prin curenții de convecție ridică temperatura mantalei inferioare. Este un fluid în rotație la o viteză determinată de spinul Pământului, așa încât apar forțe Coriolis. Acestea sunt „pseudo” forțe, nu forțe de sine stătătoare, ci rezultatul inerției într-un lichid deplasat în jurul unui centru de rotație. Ele ne sunt bine cunoscute în atmosfera și oceanele terestre, unde dirijează fluxurile de aer și apă prin care sunt create diverse sisteme climatice.

Interacțiunea diferitelor forțe din interiorul Pământului e complexă, iar simulările pe calculator sunt abia la început. Se crede totuși că forțele Coriolis acționând asupra fluidului în convecție formează coloane rotative de fier topit în nucleul extern, numite coloane Taylor (după fizicianul britanic Geoffrey Ingram Taylor), care sunt aliniate cu axa de rotație a Pământului. Când fierul topit se deplasează prin aceste coloane, creează un curent electric, iar curentul electric generează un câmp magnetic. Nucleul extern acționează ca un dinam.

Nu e vorba de un câmp magnetic permanent, ca acela al unei bare magnetice, fiindcă se bazează pe mișcarea particulelor încărcate datorate rotației din nucleul Pământului. De fapt, spre deosebire de câmpul static generat de un magnet permanent, polii nord și sud ai acestui câmp dinamic se deplasează în timp, iar în prezent polul nord se îndreaptă dinspre nordul Canadei către Siberia. Au existat momente în istoria Pământului când polii s-au inversat complet.

La fel cum, la un magnet permanent, „liniile de forță" ale câmpului magnetic se extind în spațiu dincolo de bara de fier, influența câmpului magnetic al Pământului se extinde în spațiul din jurul lui. Rezultatul este ceea ce se numește impropriu *magnetosferă*, care ar fi probabil sferică dacă n-ar interacționa cu vântul solar. În partea orientată către Soare magnetosfera e aplatizată, extinzându-se în spațiu circa 64.000 km (zece raze terestre). Frontiera ei se numește magnetopauză și este locul unde câmpul magnetic al Pământului și cel generat de vântul solar se află în echilibru. Dincolo de magnetopauză se află arcul de șoc, o regiune a spațiului unde particulele alcătuind vântul solar sunt încetinite. Partea diametral opusă față de Soare a magnetosferei formează o coadă lungă, întinzându-se în spațiu pe circa 1,3 milioane de kilometri.

În magnetosferă există o serie complexă de straturi cu diferite energii, numite plasmasferă, ionosferă și centurile de radiație Van Allen. Particulele de mare viteză încărcate electric venind din spațiu (razele cosmice) pot ajunge în ionosferă și interacționa cu câmpul magnetic al Pământului pentru a produce spectaculoasele aurore boreale (în nord) și aurore australe (în sud).

Magnetosfera formează un strat protector în jurul Pământului, deviind vântul solar şi limitând efectele sale distructive, fără a le elimina însă. Furtunile solare violente, implicând ejectarea unor imense cantităţi de gaz fierbinte de pe suprafaţa Soarelui (corona), pot intensifica vântul solar suficient pentru a pătrunde în magnetosferă. În 1859, o furtună solară a provocat scurtcircuitarea reţelelor de telegraf şi a produs aurore vizibile în Hawaii. Altă furtună din 2003 a avariat numeroşi sateliţi.

Nu avem dovezi mai vechi de 3,5 miliarde de ani privind existenţa câmpului magnetic terestru, dar pare rezonabil să presupunem că magnetismul e o proprietate fizică intrinsecă a unui nucleu extern din fier topit, odată ce nucleul s-a stabilizat.

Modelul Nisa

E o greşeală să considerăm că sistemul solar e o structură inerent stabilă, cu orbite fixe care nu se schimbă în timp, sau că planetele externe îndepărtate n-au nicio influenţă asupra planetelor terestre interne. De fapt, în perioada de formare a sistemului Pământ-lună planetele externe se află încă în „ordinea” greşită. E momentul rearanjărilor.

Nu ştim în detaliu ce s-a întâmplat, dar unele simulări recente pe calculator ale evoluţiei sistemului

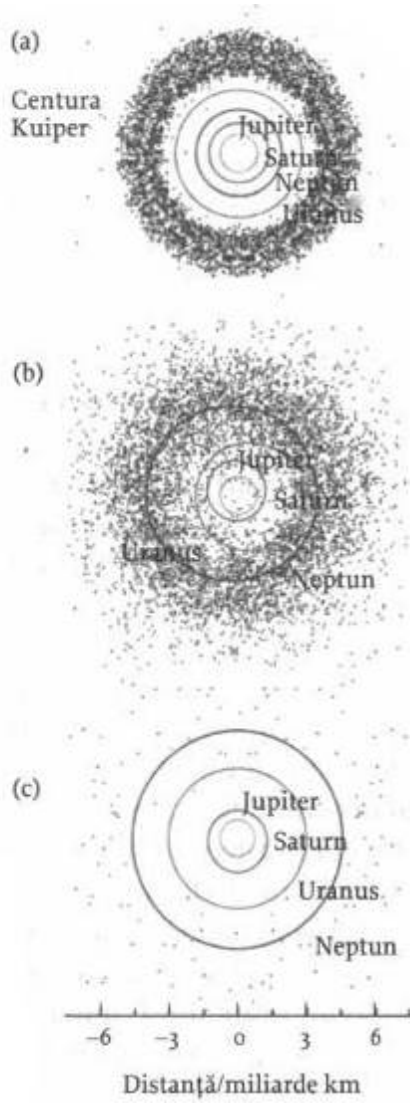


Figura 55. *Simularea pe calculator a migrației planetare din sistemul solar extern demonstrează o legătură cu perioada de intensă activitate a cometelor numită Ultimul Mare Bombardament. În (a), planetele externe sunt aliniate în șirul lor inițial, Jupiter, Saturn, Neptun și Uranus, înconjurate de o centură groasă de planetezimale numită centura Kuiper. În (b), Jupiter și Saturn intră într-o rezonanță orbitală 2:1. Neptun e împins de pe orbită de Saturn spre centura Kuiper, dislocând planetezimalele care sunt capturate de gravitația Soarelui și atrase către planetele interne (absente din figură). Jupiter e împins către centura de asteroizi, dislocând alte planetezimale. Rezultatul se vede în (c), unde planetele externe se află acum în ordinea lor „corectă", iar centura Kuiper e mult diluată. Adaptat după R. Gomes, H.F. Levison, K. Tsiganis, și A. Morbidelli,* **Nature**, *435 (2005), p. 466.*

solar sugerează următorul scenariu. Să presupunem că la vreo 90 de milioane de ani după nașterea Soarelui, planetele externe Jupiter, Saturn, Neptun și Uranus ocupă orbite aflate la 818, 1230, 1730 și respectiv 2130 milioane de kilometri de Soare. Dincolo de ele există o bandă de planetezimale numită centura Kuiper, întinsă pe distanțe de la circa 2300 la 5100 de milioane de kilometri. Modelul e prezentat în figura 55(a).

Au trecut aproximativ 700 de milioane de ani. Pământul se stabilizează, nu mai e victima unei activități vulcanice neîncetate. Magma încetează să curgă, iar suprafața se răcește. Atmosfera și oceanele produc împreună un climat moderat, totuși nu unul în care am putea supraviețui. Poate că se dezvoltă o formă primitivă de organisme

unicelulare, dar n–o vom afla niciodată, fiindcă evenimentele în curs de desfășurare sunt pe cale să șteargă din nou totul.

Jupiter și Saturn intră într-o rezonanță orbitală 2:1, ceea ce înseamnă că în timp ce Jupiter face două rotații în jurul Soarelui, Saturn face una singură. Orbitele lor devin excentrice, iar echilibrul planetelor externe e puternic perturbat de forțele gravitaționale mareice. Neptun e scos de pe orbita lui de Saturn și împins în centura Kuiper – figura 55 (b). Haos. Planetezimalele sunt dislocate și împrăștiate în întregul sistem solar. Multe sunt azvârlite la distanțe mari sau chiar dincolo de granițele lui. Orbita lui Jupiter e abătută încet spre interior, lovind alte planetezimale din centura de asteroizi. Aceste obiecte devin comete. Atrase de gravitația Soarelui, ele cad ca o ploaie asupra planetelor interne, într-un episod numit Ultimul Mare Bombardament.

Vedem dovezile acestui bombardament în suprafața plină de cratere a Lunii, care, după cum sugerează simulările, a fost izbită de circa 14 miliarde de miliarde de kilograme de materie din centura Kuiper și din centura de asteroizi, în cursul a aproximativ 150 de milioane de ani. Având o gravitație mai puternică, Pământul a primit mult mai multă materie cometară – conform simulărilor, circa 1800 de miliarde de miliarde de kilograme. Un adevărat potop.[139]

Impacturile au fost devastatoare și încă o dată totul a trebuit să fie luat de la capăt. Cele mai vechi roci găsite pe Pământ au o vechime de aproximativ 3,98 miliarde de ani, precedând Ultimul Mare Bombardament doar cu câteva sute de milioane de ani. Toate dovezile vizibile ale bombardamentului au fost șterse de pe fața Pământului pentru că scoarța continentală se află în permanentă mișcare și reînnoire. Deși există unele dovezi vagi privind viața *înainte* de acest episod, bombardamentul ar fi făcut extrem de dificilă supraviețuirea ei.

Centura Kuiper se subțiază mult, iar planetezimalele împinse spre periferia sistemului solar formează ceea ce numim „discul împrăștiat” sau Norul Oort, după astronomul olandez Jan Oort. Acesta se află la 0,75–7,5 miliarde de kilometri de Soare, la limita externă a câmpului gravitațional solar. Deși n-a fost observat direct, unii astronomi susțin că Norul Oort e sursa cometelor cu perioadă lungă și orbite foarte excentrice.

Acest scenariu se numește *Modelul Nisa* și a fost propus într-o serie de articole publicate în 2005.[140] Totuși, analizele ulterioare ale tiparelor orbitelor, pentru a explica de ce giganții gazoși n-au fost atrași mai aproape de Soare (așa cum pare să fie cazul în multe sisteme exoplanetare), erau incompatibile cu condițiile inițiale presupuse de Modelul Nisa.

În versiuni mai recente ale modelului, publicate în 2011 și numite *Nisa II,* detaliile au fost schimbate în încercarea de a elimina ceva din arbitrariul condițiilor inițiale ale primului model, precum și legătura dintre momentele migrației planetare și presupunerile privind structura periferiei sistemului solar. Natura rezonanței orbitale devine puțin mai complicată, însă rezultatul general pare să fie o instabilitate întârziată de tipul celei care poate declanșa Ultimul Mare Bombardament. Cu alte cuvinte, indiferent de condițiile inițiale, modificările orbitelor planetelor externe și bombardarea planetelor interne sunt rezultatul întârziat, dar inevitabil.

Planetele externe sunt acum în ordinea „corectă". Simulările arată că, în privința orbitelor planetare, nimic nu e predeterminat, iar ceea ce vedem azi în sistemul solar e urmarea legilor mecanice și a unei bune doze de noroc. Orbitele planetelor formează un tipar determinat de interacțiunea dintre mișcarea orbitală, spin și gravitație. În secolul XVII, Johannes Kepler a stabilit existența unei relații între perioada și raza orbitei, cunoscută ca legea a treia a lui Kepler: raportul dintre cubul razei medii și pătratul perioadei e aproximativ constant pentru toate planetele sistemului solar.[141]

Apare oare un tipar în *pozițiile* orbitale relative ale planetelor? Există o relație numerică aproximativă între razele orbitelor, legea Titius–Bode, numită după astronomii germani din secolul XVIII Johann Daniel Titius și Johann Elert Bode. Unii astronomi contemporani au respins această „lege" ca fiind o numerologie înșelătoare, dar eu cred că, deși și-au schimbat întruna locul prin capriciile rezonanțelor orbitale aleatoare, planetele trebuie apoi să se așeze în orbite destul de stabile, atât pentru ele cât și pentru planetele vecine. Conform legii Titius–Bode, asociem razei orbitale a Pământului 10 „unități", fiecare unitate reprezentând aproximativ 15 milioane de kilometri. Raza orbitală a lui Mercur este 4

+ *n* unități, unde *n* = 0, deci aproximativ 60 milioane de kilometri. Pentru Venus *n* = 3, iar orbita are 7 unități (105 milioane de kilometri), pentru Pământ *n* = 6, pentru Marte *n* = 12 (adică 16 unități sau 240 milioane de kilometri).

Ați înțeles ideea. Pentru a estima orbita următoarei planete trebuie să dublăm valoarea lui *n* și să adăugăm 4. Pentru Ceres, cel mai mare asteroid din centura de asteroizi, *n* = 24 (420 milioane de kilometri); pentru Jupiter *n* = 48 (780 milioane de kilometri); pentru Saturn *n* = 96 (1500 milioane de kilometri); pentru Uranus *n* = 192 (2940 milioane de kilometri); iar pentru Neptun *n* = 384 (5820 milioane de kilometri). Planetele

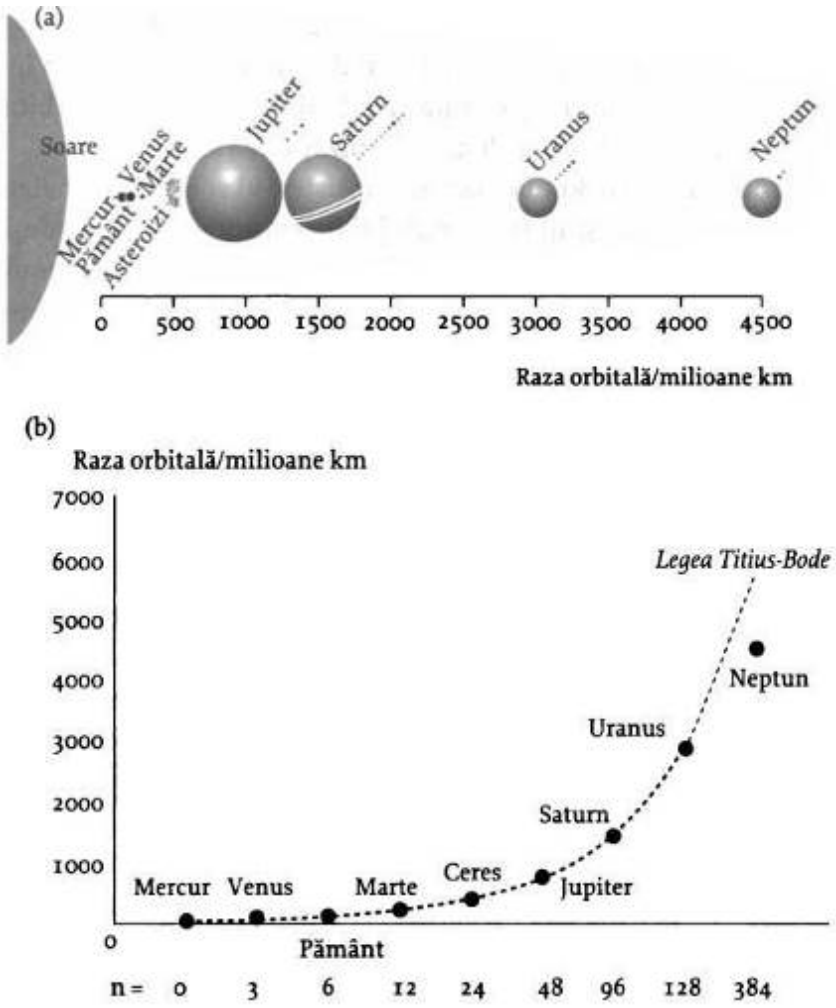


Figura 56. *După migraţia planetară şi Ultimul Mare Bombardament, la 700 de milioane de ani de la începutul formării sistemului solar, planetele au căpătat orbitele pe care le cunoaştem azi. În (a) planetele sunt desenate la scară (dar nu aceeaşi scară cu cea a distanţelor). În (b) orbitele planetare (puncte negre) sunt comparate cu predicţiile leaii Titius-Bode (linia întreruptă).*

de dincolo de Marte se află aproximativ la o distanţă dublă de Soare faţă de vecina lor. Relaţia dintre orbitele prezise de această lege numerică simplă şi orbitele reale ale planetelor e prezentată în figura 56. Legea funcţionează bine, într-o marjă de eroare de 5%, pentru toate planetele, cu excepţia lui Neptun. Ţinând cont de ceea ce credem că s-a întâmplat cu Neptun, discrepanţa de 22% dintre predicţie şi orbita reală s-ar putea să nu fie chiar surprinzătoare.

Ultimul Mare Bombardament în sistemul solar s-a încheiat. El marchează sfârşitul Hadeanului şi începutul Arhaicului, deşi nu toţi geologii acceptă această delimitare. În afară de de zirconul de la Jack

Hills, nu există vreo dovadă geologică dinainte de Arhaic. Putem totuși presupune că Hadeanul s-a încheiat cu circa 4 miliarde de ani în urmă.

Plăcile tectonice

Dacă acceptăm ca probă zirconul de la Jack Hills, atunci cu 4,4 miliarde de ani în urmă diferențierea planetară a Pământului modificat de un impact gigantic era deja avansată. Planeta avea oceane de apă lichidă aflate deasupra unei scoarțe oceanice, preponderent bazaltică, și mici mase de uscat formate din scoarță continentală, preponderent granitică.

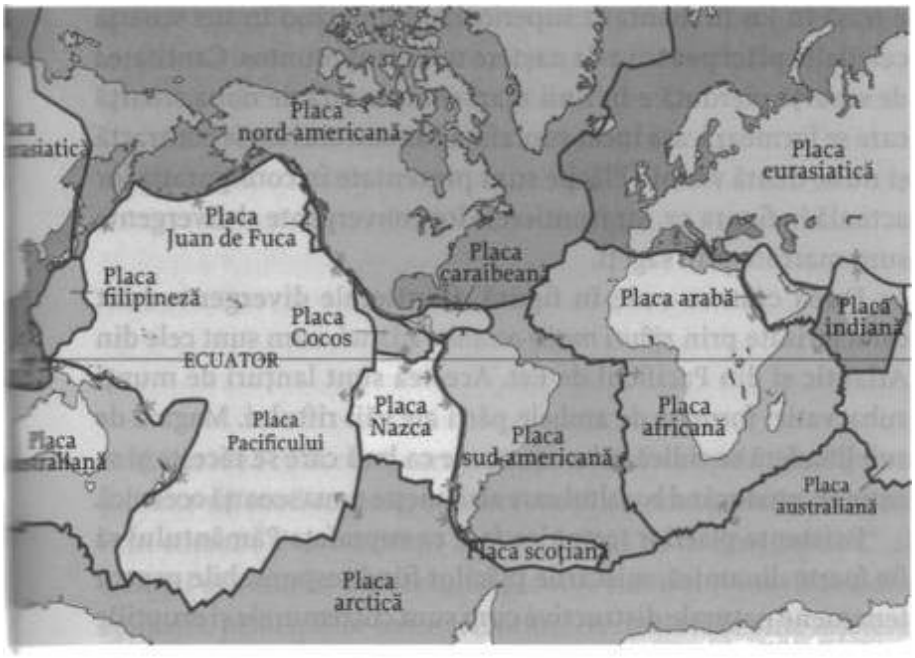


Figura 57. *Partea cea mai de sus a mantalei superioare a Pământului și scoarța (numite colectiv litosferă) se fragmentează și alcătuiesc o serie de plăci tectonice aflate în mișcare pe suprafața Pământului. Figura prezintă plăcile așa cum apar azi. Frontierele „divergente" ale plăcilor sunt marcate prin săgeți orientate opus (↔). Ele apar în mijlocul oceanelor, iar două dintre cele mai importante sunt Riftul Medio-Atlantic și Riftul Pacificului de Est. Observați că aceste frontiere divergente au tendința să se formeze pe direcția nord-sud, ceea ce ne sugerează o legătură cu rotația Pământului. De-a lungul acestor frontiere, fundul mării se extinde, reînnoind scoarța cu materie proaspătă. La o frontieră „convergentă" (→←) scoarța unei plăci e trasă în jos în mantaua superioară, împingând în sus scoarța celeilalte plăci pentru a da naștere unui lanț muntos.*

Știm că topirea prin decompresie provoacă topirea parțială a mantalei superioare. În manta se stabilesc curenți de convecție, parțial antrenați prin energia eliberată de izotopi radioactivi ai elementelor precum uraniul și potasiul. Aceștia se combină cu gravitația Pământului,

mișcarea de rotație și, poate, influențele gravitaționale exercitate de Soare și Lună într-un mecanism complex care generează mișcări ale mantalei superioare, mai rigidă, și ale scoarței (oceanică și continentală) aflate deasupra ei. Straturile superioare ale suprafeței planetei poartă numele colectiv de *litosferă*. Datorită convecției care se agită sub ea, litosferă se fragmentează în mai multe *plăci tectonice.* Locurile unde plăcile se întâlnesc se numesc *frontierele plăcilor*.

Plăcile nu plutesc pur și simplu la întâmplare pe suprafața planetei, ca niște sloiuri de gheață. Forțele care acționează asupra lor determină o mișcare de tip bandă rulantă. La o frontieră „divergentă" a plăcii, fundul mării se extinde, reînnoind scoarța cu materie proaspătă. La o frontieră „convergentă", scoarța unei plăci e trasă în jos în mantaua superioară, împingând în sus scoarța celeilalte plăci pentru a da naștere unui lanț muntos. Cantitatea de scoarță pierdută e în linii mari compensată de noua scoarță care se formează, așa încât suprafața Pământului nu se contractă și nu se dilată vizibil. Plăcile sunt prezentate în configurația lor actuală în figura 57, iar frontierele lor convergente și divergente sunt marcate prin săgeți.

După cum se vede în figură, frontierele divergente sunt caracterizate prin *rifturi medio–oceanice* adânci, cum sunt cele din Atlantic și din Pacificul de Est. Acestea sunt lanțuri de munți subacvatici formate de ambele părți ale văii riftului. Magma de sub litosferă se ridică prin rift, apare ca lavă care se răcește și se extinde, producând bazaltul care alcătuiește noua scoarță oceanică.

Existența plăcilor tectonice face ca suprafața Pământului să fie foarte dinamică, mișcările plăcilor fiind responsabile pentru fenomene naturale distructive cum sunt cutremurele și erupțiile vulcanice. Poate că aceste fenomene par blânde în comparație cu tumultul din Hadean, dar nu sunt lipsite de importanță. Activitatea vulcanică la scară mare va avea consecințe dramatice în povestea noastră.

Pământul e încă tânăr, doar circa 800 de milioane de ani, dacă luăm ca referință vârsta meteoriților condritici, sau cu 90 de milioane de ani mai tânăr, dacă ne imaginăm că Pământul s-a format din ciocnirea dintre Tellus și Theia. S-ar părea însă că are deja o atmosferă care se încălzește și oceane, o scoarță deplin formată, cu continente în derivă, și

o magnetosferă protectoare. Pământul e acum locuibil, iar ceva cu adevărat remarcabil urmează să se petreacă.

8. Imperativul cosmic

Originea vieții

Ambiția mea cu această carte e să spun povestea științifică a creației într-un mod coerent, consecvent și nu prea greu de urmărit. Prin coerent și consecvent înțeleg faptul că fiecare „episod" al creației din istoria universului decurge natural și inevitabil din aplicarea principiilor fizice și chimice, rezonabil de bine înțelese, la ceea ce fusese creat în episodul precedent. Mergând înapoi pe firul poveștii, Pământul s-a format în discul subțire de gaz și praf care se rotea în jurul unei protostele din Populația I aflate în colaps, care va deveni Soarele. Soarele s-a format prin colapsarea Norului Neith, care, la rândul lui, a fost creat prin lenta atragere laolată gravitațională a materiei ejectate de stelele muribunde din Populația a II-a. Stelele de Populația a II-a... și așa mai departe.

Desigur, ne izbim de o discontinuitate, atât în timp, cât și în explicații, chiar la „începutul" poveștii noastre. Însă odată ce universul s-a urnit la drum, teoriile noastre științifice sunt în genere capabile să ofere explicații plauzibile (sau speculații, sau cel puțin ipoteze întemeiate) privind felul în care lucrurile decurg unul din altul. În povestea științifică a creației, universul și tot ce există în el sunt construite „de jos în sus".

Suntem acum pe cale să ne izbim de o altă discontinuitate importantă în explicații. Logica elementară cere ca, în următorul episod al creației, viața să apară spontan din ingredientele chimice disponibile pe Pământul primitiv, dar devenit locuibil, ingrediente care se află departe de starea lor de echilibru. Evident, e doar o presupunere, dar nu lipsită de temei. Cu excepția gazelor nobile inerte și a elementelor chimice care au o afinitate deosebită față roci – fier, magneziu, siliciu, aluminiu –, abundența relativă a elementelor care se găsesc în toate sistemele biologice reproduce cu bună precizie abundența relativă a acestora în Soare și în meteoriții condritici.[142] Există unele excepții notabile,[143] dar nu–ți trebuie multă imaginație pentru a conchide că viața pur și simplu

a folosit eficient materialele disponibile pe Pământ. Ceea ce sugerează că viața pe Pământ, la fel ca universul însuși, s-a construit de jos în sus.

Să presupunem deci că biologia complexă decurge în mod necesar din chimia simplă de pe Pământul primitiv și din energia disponibilă acestor sisteme chimice. Din nou, logica simplă pare să impună existența a cel puțin trei pași în acest episod al creației. Întâi, trebuie să folosim energia disponibilă pentru a construi „cărămizile" fundamentale ale sistemelor biologice – aminoacizi, acizi nucleici, glucide, baze și lipide (voi explica ce sunt fiecare). Apoi, trebuie asamblate aceste cărămizi în sisteme moleculare complexe capabile de autoreplicare, metabolism și evoluție. În al treilea rând, sistemele moleculare trebuie înglobate în structuri celulare simple.

Aici ne izbim de discontinuitate. Orice teorie a originii vieții va trebui să conțină și să explice fiecare dintre acești pași sau să găsească vreun argument convingător – și acceptabil științific – că acești pași nu sunt corect concepuți sau nu sunt necesari. Cei trei pași, care duc de la chimia simplă la incredibil de complexa chimie a sistemelor, întâlnită în organismele vii, au făcut obiectul a numeroase teorii, iar despre unele vom vorbi mai jos. Dar existența unor structuri chimice complexe într-un săculeț de apă protejat de o membrană celulară subțire nu înseamnă că avem biologie. Nu ni-l oferă pe ultimul strămoș comun universal (*last universal common ancestor*– LUCA), organismele unicelulare primitive din care se crede că au descins toate formele de viață de pe Pământ.

Ingredientul lipsă implică *abiogeneza,* generarea spontană a vieții din chimia complexă nevie – ceea ce se va fi petrecut în urmă cu 4,4–3,5 miliarde de ani, probabil pe când planeta își revenea după Ultimul Mare Bombardament. Dacă acest lucru s-a petrecut cu adevărat, e aproape sigur că nu s-a mai repetat. În întreaga istorie a științei nu s-a observat niciodată ca viața să apară din altceva decât din viață.

Această lacună în înțelegerea noastră e uriașă. Deși o simțim permanent și o recunoaștem oriunde o vedem, nu știm cu adevărat ce e viața. Nu există o teorie cuprinzătoare, științific testată, sau un „model standard" pentru viață. Orice încercare de definire a vieții s-a dovedit a fi inutilă, căci excepții de la „regulile" impuse de asemenea definiții sunt lesne de găsit în diversitatea imensă a organismelor vii de pe Pământ.

Problema abiogenezei a frământat mințile unor mari savanți. Francezul Jaques Monod, laureat al Premiului Nobel, susținea în importanta sa monografie 1970 *Hazard și necesitate* că viața a apărut pe Pământ din pură întâmplare:[144]

Vechea făgăduială e distrusă; omul știe cel puțin că e singur în imensitatea rece a universului, din care a apărut doar prin hazard. Destinul și datoria lui nu sunt scrise nicăieri. Împărăția cerurilor sau întunericul din adâncuri; el trebuie să aleagă.

În cartea *Lifecloud* din 1978, astrofizicianul englez Fred Hoyle și astrobiologul Chandra Wickramasinghe susțineau ideea unei forme de *panspermie*, în care bacterii și virusuri preformate sunt aduse pe Pământ de comete. În 1981, biochimistul englez Francis Crick, laureat Nobel împreună cu James D. Watson și Maurice Wilkins pentru descoperirea structurii ADN-ului, conchidea că singura explicație posibilă pentru apariția vieții pe Pământ este *panspermia orientată.* Cu alte cuvinte, viața a fost deliberat însămânțată de forme de viață extraterestre, după cum bine înțeleg fanii filmului lui Ridley Scott *Prometheus,* urmarea lui *Alien.*

Desigur, panspermia – orientată sau nu – aduce cu sine altă întrebare. Dacă viața de pe Pământ își are originea altundeva în univers, atunci cum a apărut *acea* viață din ingredientele chimice neînsuflețite care presupunem că erau disponibile în istoria timpurie a universului? Problema este atât de dificilă, încât cred că singura atitudine posibilă e una îndrăzneață, așa cum au demonstrat Monod, Hoyle, Wickramasinghe și Crick.

Iată ce vă propun în continuare. Avem motive întemeiate să credem că, la doar câteva sute de milioane de ani după Ultimul Mare Bombardament, înflorea deja pe Pământ viața bacteriană bazată pe o chimie care, deși complexă, depindea de elementele chimice aflate pe sau sub suprafața continentelor și oceanelor. Presupun deci că viața e un rezultat perfect natural al proprietăților și comportamentului substanțelor chimice disponibile și al condițiilor existente pe Pământul primitiv. În acest scenariu, viața e o *necesitate,* nu rezultatul hazardului, al unui miracol sau al panspermiei. Prin „necesitate” înțeleg faptul că asamblarea ingredienților chimici pe o planetă caldă, umedă și

stâncoasă, cum e Pământul, în condițiile de la începutul istoriei sale, face ca viața să apară cu o probabilitate ridicată, aproape de certitudine.

Dată fiind larga răspândire a exoplanetelor asemănătoare Pământului, viața trebuie să existe și altundeva în univers. După cum spunea biochimistul belgian laureat Nobel Christian René, viconte de Duve, viața e un *imperativ cosmic*.[145]

Luând toate acestea în considerare [...] procesele sugerează că originea vieții putea să fi fost aproape obligatorie în aceste condiții fizico–chimice dominante în locul nașterii ei.

Dar nu vă faceți iluzii. Nu mă puneți să demonstrez acest imperativ cosmic sau să explic cum și de ce a acționat. Eu fac aici o presupunere riscantă și recunosc că dovezile științifice în favoarea ei sunt vagi. Așadar, ce credem că știm?

Cărămizile vieții

În ciuda biodiversității extraordinare, toate formele de viață se întemeiază în linii mari pe același set de structuri celulare și sisteme biochimice care sunt folosite pentru obținerea energiei, metabolism, creștere și replicare. La baza acestor procese biologice fundamentale se află un set de mecanisme biomoleculare, implicate (între altele) în captarea, transferul și stocarea energiei, precum și în menținerea, transferul și replicarea informației genetice care specifică despre ce fel de viață e vorba. Pentru a simplifica lucrurile, voi vorbi despre două tipuri de cărămizi fundamentale: aminoacizii, constituenții proteinelor, și nucleotidele, implicate în structurile moleculare complexe care conțin informația genetică și codifică producerea proteinelor.

Vom începe cu aminoacizii. Ei alcătuiesc o clasă de compuși formați din două grupări funcționale, o grupare amino ($-NH_2$) și o grupare carboxil ($-CO_2H$). Acești compuși se deosebesc între ei prin prezența unei a treia grupări care formează o catenă laterală, notată de obicei prin „R”. Cu unele excepții, putem scrie o formulă generală pentru aminoacizi ca $H_2N–CHR–CO_2H$. Cunoaștem vreo 500 de aminoacizi, însă doar 20 sunt intim implicați în sistemele biologice. Aceștia pot fi clasificați după natura catenei lor laterale (vezi figura 58).[146]

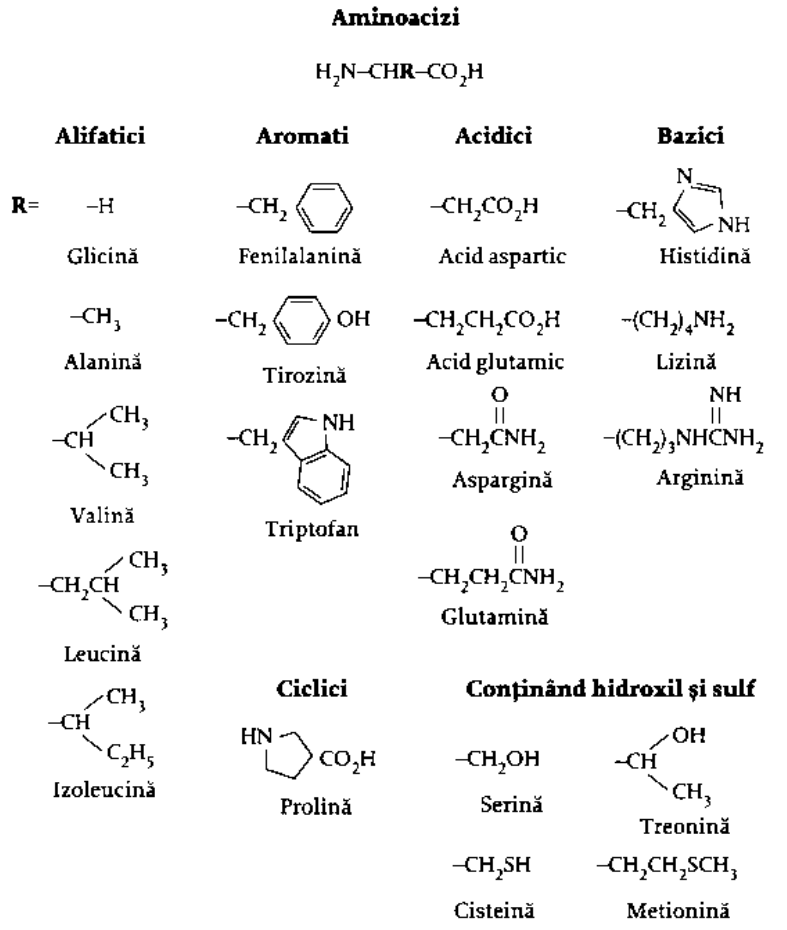


Figura 58. *Cei 20 de aminoacizi implicaţi în sistemele biochimice, organizaţi în funcţie de natura structurii lor chimice. Majoritatea (19 din 20) se conformează formulei generale de sus. Excepţie face aminoacidul ciclic prolină. Vezi nota 4 de la sfârşitul cărţii pentru o explicaţie a structurilor ciclice din prolină, fenilalanină, tirozină, triptofan şi histidină.*

Prezint aceste structuri chimice cu titlu de informaţie – nu e nevoie să le reţinem. Există totuşi o trăsătură generală a lor care se va dovedi importantă în cele ce urmează. Amintiţi-vă din capitolul 5 că interacţiunea subtilă a diferiţilor orbitali atomici ai carbonului, azotului şi oxigenului duce la formarea orbitalilor moleculari (sau a perechilor de electroni singuratici) orientaţi în anumite direcţii. Orbitalii de hidrogen 1s se ataşează pur şi simplu de lobii acestor orbitali pentru a forma legături C–H, N–H şi O–H.

Să examinăm proprietăţile spaţiale ale aminoacidului alanină. Figura 59(a) arată că putem distribui diferitele grupări funcţionale şi catena laterală (în acest caz, R este – CH_3 în jurul a trei din cele patru vârfuri ale tetraedrului format de atomul central de carbon, lăsând un singur

atom de hidrogen să ocupe al patrulea vârf. E destul de simplu. Observăm însă că există două moduri de a o face. De pildă, putem plasa atomul de hidrogen în vârful din dreapta–spate și gruparea amino în vârful din dreapta–față, așa cum se vede în figură. Sau putem plasa gruparea amino în dreapta–spate și atomul de hidrogen în dreapta–față. E vreo diferență? Da. Cele două posibilități sunt ca două imagini în oglindă, după cum se vede în figura 59(b).

Imaginați–vă că luați versiunea alaninei din stânga figurii 59(b), o rotiți și o suprapuneți pe versiunea din dreapta. Gruparea amino din stânga e orientată în sus, perpendicular pe planul hârtiei, iar după rotație e orientată perpendicular în jos. Dar gruparea amino din dreapta e orientată perpendicular în sus. Prin urmare, cele două structuri nu pot fi suprapuse. Deși conțin exact aceleași grupări funcționale (ambele sunt alanină), ele sunt totuși *molecule diferite.* Spunem că aceste molecule sunt *chirale*, iar diferitele lor forme se numesc *enantiomeri.* Formele diferite de alanină pot fi deosebite prin efectul lor asupra luminii plan polarizate. O soluție de enantiomer pur va roti planul de polarizare a luminii care trece prin ea. Enantiomerul care rotește polarizarea spre stânga e notat cu L– (de la *levogir*), iar cel care o rotește spre e notat cu D– (de la *dextrogir*). Iată ceva interesant. Cu excepția glicinei, care nu prezintă chiralitate (fiindcă are două legături C–H identice legate de atomul central de carbon, deci nu poate avea o formă diferită în oglindă), toți aminoacizii implicați în procesele biomoleculare sunt levogiri.

Al doilea tip de „cărămizi" pe care vreau să-l prezint aici poartă numele colectiv de *nucleotide*. Acestea sunt unitățile din care sunt alcătuiți acidul ribonucleic (AM) și acidul dezoxiribonucleic (ADN). Nucleotidele au trei ingrediente principale. Primul e un tip anume de moleculă glucidică, un inel pentagonal conținând un singur atom de oxigen și fie o grupare hidroxil (–OH, numită dezoxiriboză), fie două grupări hidroxil (riboză). Atașată de inel se află o grupare fosfat, cu una ($–CH_2OPO_3^{2–}$), două ($–CH_2OPO_3^{–}PO_3^{2–}$) sau trei ($–CH_2OPO_3^{–}PO_3^{–}PO_3^{2–}$) unități de fosfat. Al treilea ingredient atașat glucidei e o așa–numită bază azotată.

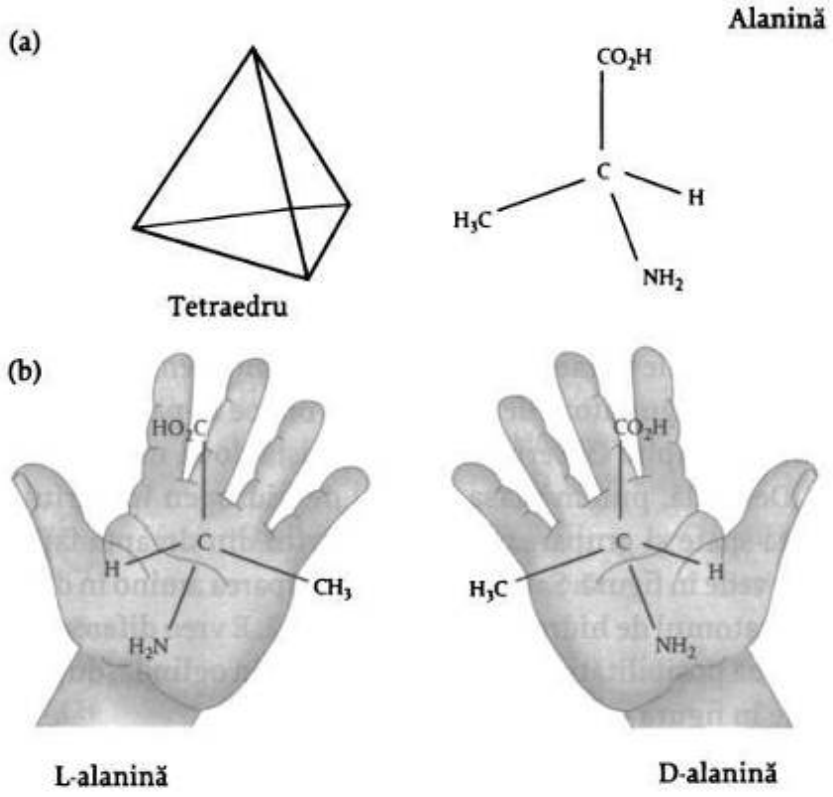


Figura 59. *Aminoacidul alanină conține patru elemente (atom și grupări funcționale) legate de atomul central de carbon, fiecare ocupând câte un vârf al tetraedrului (a). Există două moduri de a distribui aceste elemente, unul fiind imaginea în oglindă a celuilalt (b). Asemenea molecule se numesc chirale, iar diferitele lor forme se numesc enantiomeri.*

Bazele azotate sunt de două tipuri: purine și pirimidine. Purinele sunt reprezentate de adenină și guanină, iar pirimidinele de citozină, timină și uracil.

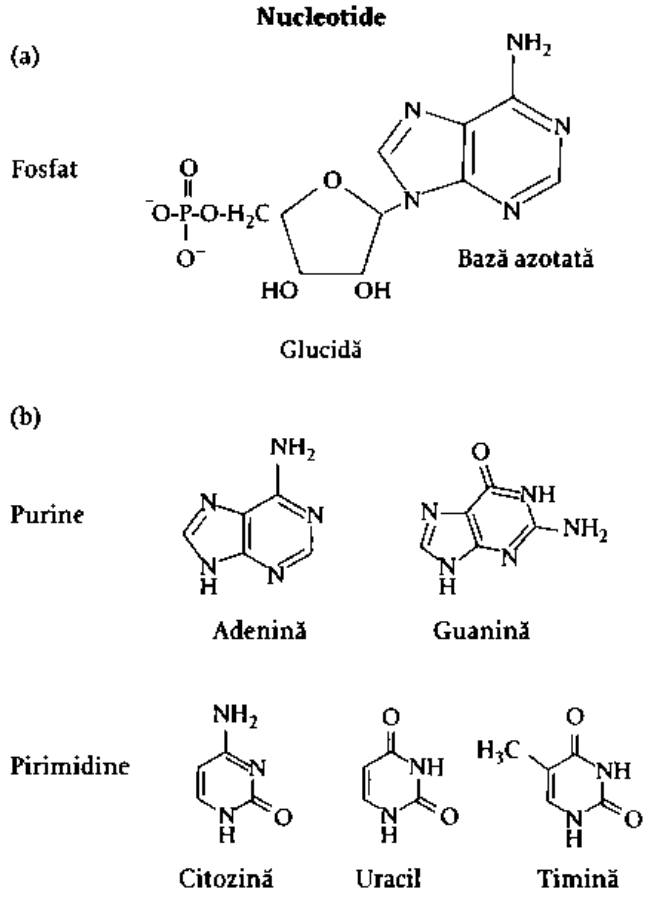


Figura 60. *Nucleotidele sunt cărămizile din care sunt alcătuiți ARN-ul și ADN-ul. Ele constau dintr-o unitate glucidică de riboză pentagonală (sau deoxiriboză), o unitate fosfat cu una, două sau trei grupări fosfat și o bază azotată (a). Bazele sunt purinele (adenină, guanină) sau pirimidinele (citozină, timină și uracil), prezentate în (b). Nucleotida din (a) posedă o adenină și o singură grupare fosfat, și se numește adenozin monofosfat (AMP).*

Aceste ingrediente și asamblarea lor pentru a forma o nucleotidă numită adenozin monofosfat (AMP) sunt prezentate în figura 60. Din nou, aceste structuri sunt prezentate doar cu titlu de informație, nu–i nevoie să le reținem.

Deși nu e evident din figura 60(a), unitatea riboză din nucleotidă prezintă și ea forme chirale. Atomul de carbon de la stânga oxigenului din inel e legat de patru grupări diferite. Există, în inel, legătura C–O și cea cu gruparea –CH(OH), a treia legătură e cu gruparea fosfat – $CH_2OPO_3^{2-}$, iar a patra cu un atom de hidrogen (C–H), care nu apare decât implicit în figură. Știm din cazul alaninei, conform figurii 59(b,), că atunci când patru grupări diferite sunt legate de un atom central de

carbon putem aranja grupările în două forme, una fiind imaginea în oglindă a celeilalte, imposibil de suprapus. Același lucru e valabil pentru riboză (și dezoxiriboză). Interesant este că deși L–enantiomerii aminoacizilor sunt cei exclusiv implicați în proteine, D–enantiomerii ribozei și dezoxiribozei sunt cei implicați în construcția nucleotidelor, deci a ARN-ului și ADN-ului. Vom reveni la acest aspect.

Figurile 58 și 60 ne spun câte ceva despre complexitatea structurilor moleculare care joacă roluri importante în sistemele biologice. Lucrurile încep să se complice, dar observați că viața se întemeiază pe relativ puține elemente chimice. Avem de-a face cu substanțe chimice complexe alcătuite din multe catene și inele, însă doar câteva elemente sunt implicate – cu precădere carbon, azot, oxigen și hidrogen, care constituie peste 98% din masa tuturor celulelor vii, la care se adaugă puțin fosfor și sulf. În capitolele următoare vom observa cum intră în acțiune alte elemente, de pildă fierul. Este limpede că viața n-ar fi putut apărea pe Pământ dacă n-ar fi existat din abundență aceste cărămizi din care sunt alcătuite moleculele complexe. Dar cum au fost produse aceste cărămizi?

Livrarea exogenă: cărămizi din spațiul cosmic

Poate că avem deja o parte din răspunsul la această întrebare. Să privim tabelul 2 din capitolul 5. Nu–i exclus ca în spațiul interstelar să existe aminoacizi și mai complecși, poate chiar elementele esențiale pentru construirea nucleotidelor. Acești compuși n-au fost încă detectați în norii moleculari, dar au fost găsiți în meteoriți.

Meteoritul Murchison e un condrit carbonatic căzut pe Pământ la data de 28 septembrie 1969 ora 11 a.m., lângă orașul Murchison din Australia. S-a fragmentat în atmosferă, împrăștiindu-se pe o suprafață de 13 kilometri pătrați. Au fost recuperate peste 100 de kilograme din meteorit. Studiul analitic al unui eșantion de 10 grame, publicat în 1970, dezvăluia prezența glicinei, alaninei, valinei, prolinei și a acidului glutamic, iar cercetări ulterioare au identificat și tirozină, metionină, fenilalanină, precum și un exces de L-alanină față de D–alanină. Prezența chiar și într-un ușor exces a unui L–enantiomer e stranie, fiindcă e de așteptat ca sinteza chimică în spațiul interstelar să producă formele L– și D– în cantități egale, ceea ce i-a făcut pe unii oameni de

știință să creadă că eșantioanele au fost contaminate de surse terestre de aminoacizi, care sunt exclusiv levogiri. Dar aminoacizii treonină și serină, care ar fi indicat contaminarea, au fost găsiți în cantități infime. Aceasta sugerează că ceilalți aminoacizi nu sunt de origine terestră.

Cum s-ar putea forma aceste substanțe? Este greu de dat un răspuns tranșant, dar asemenea analize arată că aminoacizii ar putea fi produși printr-un șir de reacții chimice descoperit de chimistul german Adolf Strecker în 1850. Să luăm din nou drept exemplu alanina. În sinteza lui Strecker începem cu acetaldehidă (CH_3CHO) și o punem să reacționeze cu ioni de amoniu (NH_4^+) în prezența unei surse de cianură (HCN sau KCN). Rezultă metilaminonitril ($H_2N–CH(CH_3)–CN$), care reacționează apoi cu apa, înlocuind gruparea –CN cu $–CO_2H$, pentru a produce alanină. Observați că toate substanțele inițiale ale sintezei se află pe lista moleculelor interstelare din tabelul 2.

Povestea nu se încheie cu aminoacizii. Un studiu din 2008 al eșantioanelor aceluiași meteorit dezvăluia prezența pirimidinei uracil și a purinei xantină (înrudită cu guanina, neimplicată în construcția ARN-ului și ADN-ului, dar cu o anumită semnificație biochimică). Aceste studii erau orientate către găsirea compușilor despre care se credea că sunt relevanți pentru chimia „prebiotică”, precursorul chimic logic al biologiei. Un studiu analitic mai sofisticat și mai vast, publicat în 2010, dezvăluia că meteoritul Murchison conține zeci de mii de substanțe organice.

Dacă un singur meteorit poate conține o asemenea diversitate de compuși organici, între care multe cărămizi esențiale pentru apariția vieții, atunci e oare posibil ca aceste substanțe să fi fost livrate Pământului pe cale exogenă (adică din „exterior”, din spațiul interstelar)? Oare motivul pentru care nu găsim dovezi ale existenței vieții înainte de Ultimul Mare Bombardament este că acest bombardament a furnizat în cantități suficiente cărămizile esențiale vieții?

Estimările cantității de substanțe organice prebiotice disponibile pe Pământul primitiv depind critic de ipotezele privind natura atmosferei la acel moment. Totuși, conform uneia dintre estimări, pe Pământul

primitiv se acumulau *anual* o sută de miliarde de kilograme de materie organică, preponderent din livrare exogenă prin intermediul cometelor.[147] Cantitatea de biomasă de pe Pământul actual este de ordinul a unui milion de miliarde de kilograme de carbon. Dacă în linii mari estimările privind materia organică prebiotică disponibilă sunt corecte, atunci o cantitate egală cu biomasa de azi s-a acumulat pe Pământul primitiv în doar zece mii de ani.

Ideea că au fost livrate „preambalat" din spațiu cărămizile vieții pe Pământ e atrăgătoare, dar poate nu e cazul să ne lăsăm duși de val. Livrarea e doar începutul. Cărămizile ar fi trebuit să supraviețuiască impactului (și pesemne un scenariu mai plauzibil este că acești compuși sunt sintetizați în șocul impactului). Ulterior e nevoie ca ele să fie „despachetate". Ceea ce e mai puțin dificil dacă meteoritul constă în principal din gheață, dar mai greu dacă meteoritul e o rocă ce trebuie erodată într-o mare caldă. Iar apoi? Orice substanțe organice extrase din meteoriți vor fi probabil dispersate în vastele oceane ale Pământului, oceane învolburate continuu de influența gravitațională a unei Luni aflată la distanță mult mai mică decât azi. Din păcate, al doilea pas în drumul spre viață presupune aranjarea acestor cărămizi în lanțuri lungi, pentru a forma în cele din urmă proteine și acizi nucleici. Această apropiere a cărămizilor va fi foarte dificilă dacă sunt diluate într-un volum mare de apă.

Supa primordială și experimentele Miller–Urey

Admițând că, parțial sau în întregime, cărămizile au fost asamblate pe Pământ, trebuie să facem presupuneri suplimentare privind condițiile existente la acel moment pe Pământ. Una e să ai toate ingredientele chimice disponibile, alta e să le pui laolaltă în condiții care vor favoriza reacțiile chimice necesare. Într-o scrisoare din 1871 către prietenul său John Hooker, Charles Darwin ne–a oferit unele indicii despre felul în care credea că aceasta putea să se fi petrecut:[148]

Se spune adesea că toate condițiile pentru cea dintâi producere a unui organism viu care au fost prezente vreodată sunt prezente și acum. Dar dacă (vai, ce mare e acest *dacă*!) ne-am putea imagina că în vreun iaz mic și cald, cu tot felul de săruri de amoniu și de fosfor, cu lumină, căldură, electricitate etc., s-ar forma pe cale chimică un compus proteic

pregătit să sufere schimbări şi mai complexe, atunci în ziua de azi o asemenea materie ar fi instantaneu devorată sau absorbită, ceea ce nu va fi fost cazul înainte de formarea fiinţelor vii.

Metafora lui Darwin cu „iazul mic şi cald" e fascinantă. Atât de fascinantă, încât a fost tradusă şi extinsă în anii 1920 de biochimistul rus Aleksandr Oparin, iar în 1929 de multilateralul savant indian născut în Marea Britanie J.B.S. Haldane. Ea a devenit cunoscută drept ipoteza „supei primordiale". Oparin şi-a imaginat un Pământ primitiv cu o atmosferă puternic reducătoare, compusă din metan, amoniac, hidrogen şi vapori de apă. Haldane credea că oceanele primitive acţionau ca mari laboratoare de chimie, transformând compuşii anorganici din atmosferă într-o „supă diluată fierbinte" de materiale organice din care a apărut biochimia.

Toate acestea erau speculaţii, dar în 1953 ele au căpătat consistenţă prin rezultatele unor experimente ale chimistului american Stanley Miller din laboratorul de la Chicago al laureatului Nobel Harold Urey. Miller voia să studieze chimia prebiotică, în ciuda împotrivirii iniţiale a lui Urey, îndrumătorul tezei sale de doctorat. Ei au conceput un experiment relativ simplu, în care un amestec de metan, amoniac, hidrogen şi vapori de apă era circulat printr-un dispozitiv şi supus descărcărilor electrice periodice între doi electrozi.

Darwin înţelesese bine că nu era de-ajuns să pui în contact ingredientele chimice. Ca să faci să reacţioneze aceste substanţe anorganice pentru a obţine substanţe organice e nevoie de o formă de energie care să iniţieze reacţiile, şi vorbea despre „lumină, căldură, electricitate etc.". În ipoteza supei primordiale, palidul Soare tânăr nu oferea pesemne suficientă lumină ultravioletă şi căldură,[149] dar fulgerele din atmosfera primitivă erau o sursă de energie la îndemână.

Descărcările electrice din experimentele Miller–Urey erau menite a simula efectele fulgerelor. Amestecul de gaze aflat în circulaţie era răcit şi colectat într-un recipient cu apă lichidă (simulând oceanul) care era constant încălzită şi se evapora încet, vaporii trecând apoi iarăşi printre electrozi pentru a fi supuşi unei noi runde de descărcări electrice. Astfel, amestecul de compuşi anorganici simpli era în permanenţă circulat între o „atmosferă" încărcată electric şi un „ocean". Întrebarea

era: ce fel de substanţe chimice s-ar produce după o săptămână de circulaţie continuă prin dispozitiv? Miller spunea:[150]

Apa din recipient a devenit roz după prima zi, iar la sfârşitul săptămânii soluţia era de culoare roşu închis şi tulbure.

Miller a tratat soluţia obţinută cu substanţe toxice, pentru a se asigura că nu va fi contaminată ulterior cu organisme vii. Analizele au arătat că, după doar o săptămână, experimentul produsese glicină, alanină şi (poate) acid aspartic.

Miller a consemnat rezultatele într-un articol, însă Urey a refuzat să fie trecut coautor, fiindcă voia ca meritul să-i revină în întregime lui Miller (delicat lucru, luând în considerare reputaţia lui Urey). După o scurtă amânare, articolul lui Miller a fost publicat în numărul din 15 mai 1953 al revistei *Science.* Celebritatea îi era acum asigurată. Au urmat alte experimente şi analize mai minuţioase, în care Miller a găsit nouă aminoacizi şi câţiva hidroxiacizi importanţi în biologie, analogi ai aminoacizilor în care gruparea amino e înlocuită de o grupare hidroxil (de pildă, acidul lactic, HO–CH (CH_3)–CO_2H, hidroxiacidul corespunzător alaninei). De asemenea, a dedus că şirul reacţiilor chimice care produsese aminoacizii era în esenţă sinteza lui Strecker.

În 1954 Miller şi-a susţinut doctoratul. La începutul anilor 1970 a reluat experimentul şi, graţie îmbunătăţirii tehnicilor analitice, a găsit acum 33 de aminoacizi în soluţia rezultată, între care mai mult de jumătate din cei 20 de compuşi de importanţă biologică. La scurt timp după moartea sa, survenită în 2007, în laboratorul lui au fost găsite câteva flacoane cu reziduri uscate, provenind din experimentele efectuate de Miller în perioada 1952–1954, precum şi flacoane de la experimentele din 1958 cu amestecuri de metan, amoniac, hidrogen sulfurat şi dioxid de carbon, care nu fuseseră niciodată analizate. În aceste eşantioane vechi s-au găsit 22 de aminoacizi, mult mai mulţi decât reuşise Miller să identifice la acea vreme. Experimentele din 1958 au produs 23 de aminoacizi, între care şi metionina. Concluzia pare inevitabilă: cărămizile vieţii au fost generate spontan prin procesele fizico–chimice naturale în atmosfera şi oceanele Pământului primitiv.

Există însă un mare „dar”. Problema cu o asemenea chimie prebiotică este că ceea ce obţii depinde în mod necesar atât de ceea ce ai introdus, cât şi de condiţiile pe care le aplici, iar nimeni nu cunoaşte exact compoziţia atmosferei Pământului primitiv sau condiţiile de acum patru miliarde de ani. Au apărut voci critice. Cine a spus că atmosfera Pământului primitiv trebuie să fie reducătoare? S-a afirmat că amoniacul şi metanul ar fi fost rapid distruse de lumina ultravioletă a tânărului Soare şi că atmosfera era dominată de azot (N_2) şi dioxid de carbon (CO_2).[151] Experimente de tip Miller–Urey cu azot şi dioxid de carbon au produs cantităţi mici de aminoacizi, dar rezultatele se pot schimba dacă facem alte presupuneri privind conţinutul oceanelor primordiale.

Nimic nu e cert. Indiferent de condiţii, ipoteza supei primordiale nu rezolvă problema dispersiei. Experimentele Miller–Urey au produs o gamă uimitoare de aminoacizi pentru că dispozitivul concentrează aceşti compuşi într-un rezervor cu apă relativ mic, însă pe Pământul primitiv, aminoacizii şi nucleotidele produse, se aflau în concentraţii foarte scăzute în ocean.[152]

Izvoarele hidrotermale

Să ne întoarcem la harta plăcilor tectonice din figura 57, în particular la frontierele divergente din mijlocul oceanelor Atlantic şi Pacific. De-a lungul acestor rifturi medio–oceanice se află răspândite o serie de *izvoare hidrotermale.* Apa mării care se scurge prin rocile poroase e încălzită de magmă la temperaturi între 60°C şi 460°C, apoi e împinsă în ocean prin fisurile scoarţei. Deşi ajunge la asemenea temperaturi înalte, apa nu iese sub formă de vapori. La aceste adâncimi, presiunea poate fi de 300 de ori mai mare decât presiunea atmosferică normală, aşa încât apa iese sub formă lichidă, ca fluid supercritic, având deopotrivă proprietăţi de gaz şi de lichid.

Când elementele chimice dizolvate în apa supraîncălzită destul de acidă întâlnesc apa rece mai curând alcalină din adâncul oceanului (cu o temperatură de circa 2°C), acestea precipită rapid ca minerale, formând „hornuri” cilindrice. Răcirea rapidă nu–i suficientă, e nevoie şi de chimie. Sosind la suprafaţă, sulfurile metalice şi oxizii metalici din

fluidele din izvoare nu precipită până nu intră în contact cu apa alcalină a oceanului. Deoarece aceste structuri de horn sunt compuse din minerale sulfuroase, ele sunt de regulă negre și prin ele curge o apă supraîncălzită neagră. Poartă numele de „hornuri negre” și au fost descoperite în 1977, de-a lungul Riftului Pacificului de Est. Dimpotrivă, „hornurile albe” degajă minerale deschise la culoare, bogate în bariu, calciu și siliciu.

Ei bine, aceste sisteme de izvoare hidrotermale găzduiesc în prezent o mare diversitate de comunități biologice, între care așa–numitele bacterii chemosintetizante, capabile să „digere” hidrogenul sulfurat, pe care-l combină cu oxigenul dizolvat în ocean și sintetizează substanțe organice în absența luminii. Aceste organisme de la baza lanțului trofic susțin organisme mai mari, cum ar fi melci, scoici, midii, creveți, viermi tubulari (până la 2 metri lungime!), crabi, pești și caracatițe. La momentul descoperirii lor, nimeni nu se aștepta cu adevărat să găsească viață înflorind la asemenea adâncimi în Oceanul Pacific.

În urmă cu mai bine de trei miliarde și jumătate de ani, aceste forme de viață nu existau. Oare prezența lor neagă un adevăr simplu? E posibil ca izvoarele hidrotermale să ofere sursa de energie, accesul la ingredientele chimice și condițiile fizico–chimice necesare apariției vieții? Părerile sunt împărțite. Unii oameni de știință (cum ar fi Stanley Miller) susțin că hornurile negre nu ar fi un mediu prielnic originii vieții.[153] Aceste sisteme de izvoare au o vechime de doar câteva sute de milioane de ani, deci sunt prea tinere pentru a servi drept incubatoare ale vieții. Substanțele organice complexe sunt destul de fragile și e foarte probabil să se descompună la temperaturile și presiunile de acolo. Apoi, ne lovim din nou de problema dispersiei, care pune în dificultate ipoteza livrării exogene și pe cea a supei primordiale.

Alții, în special Michael Russell (în prezent la Jet Propulsion Laboratory, de pe lângă Institutul Tehnologic din California) și colegii săi, susțineau în 1989 că ar fi mai potrivit un alt tip de izvor hidrotermal, ceva mai rece și mai alcalin decât hornurile negre. Deși argumente de ordin geologic și geochimic pledau în favoarea existenței unor asemenea sisteme, nu fusese găsit niciunul. Ele au fost descoperite abia în decembrie 2000. Aceste *izvoare hidrotermale alcaline* nu sunt rezultatul

activității vulcanice de sub fundul mării, ci apa de mare se infiltrează prin fisurile scoarței oceanice până la adâncimi de 7–8 km, unde temperaturile sunt în jurul a 200°C, iar apa încălzită intră în contact cu peridotitul din mantaua superioară și se produce un alt tip de rocă, numit serpentinit. Pentru a ne face o idee despre ce se întâmplă, să alegem anumite ingrediente chimice. Olivina e componentul principal al peridotitului (figura 52) și constă în silicați de magneziu și fier – Mg_2SiO_4 și Fe_2SiO_4. Silicatul de magneziu reacționează cu apa, rezultând serpentinit, $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, și hidroxid de magneziu. Silicatul de fier reacționează cu apa, rezultând magnetit (un oxid de fier), dioxid de siliciu și hidrogen molecular (H_2). În prezența dioxidului de carbon (generat de activitatea vulcanică de-a lungul frontierelor plăcilor și dizolvat în oceanele Pământului primitiv), aceste reacții de „serpentinizare” vor produce de asemenea metan și alți compuși organici.

Reacțiile eliberează o cantitate mare de căldură, care împinge fluidul puternic alcalin înapoi spre suprafață, pentru a forma un izvor hidrotermal, dar cu temperaturi mai modeste, de 40–90°C. Calciul transportat de fluidul alcalin precipită sub formă de carbonat de calciu la contactul cu apa rece a oceanului și produce depozite de hornuri albe. Magneziul din fluidul izvorului precipită la rândul lui, acoperind hornurile cu un strat de hidroxid de magneziu.

Dacă hornurile albe și negre se află de regulă la câțiva kilometri de „centrii de extindere” ai lifturilor medio–oceanice, primul sistem de izvoare hidrotermale alcaline – numit „Orașul Pierdut” – a fost descoperit în apropierea muntelui submarin Atlantis, la circa 15 km de Riftul Medio–Atlantic.[154] E constituit din vreo 30 de hornuri cu o înălțime de 30–60 de metri (figura 61) și are o vechime de cel puțin 100.000 de ani. Unii oameni de știință cred că un asemenea câmp de izvoare poate supraviețui sute de mii de ani.

Cum ar putea însă aceste izvoare hidrotermale alcaline produce compuși organici? Toate scenariile originii vieții necesită „fixarea” carbonului din surse anorganice simple – cum ar fi dioxidul de carbon – și încorporarea lui în structuri chimice mult mai complexe, iar toate formele de viață din prezent depind de fixarea carbonului. Presupunem

că Pământul primitiv avea mult dioxid de carbon dizolvat în oceanele sale, pesemne și metan. Fixarea carbonului din dioxidul de carbon necesită hidrogen.

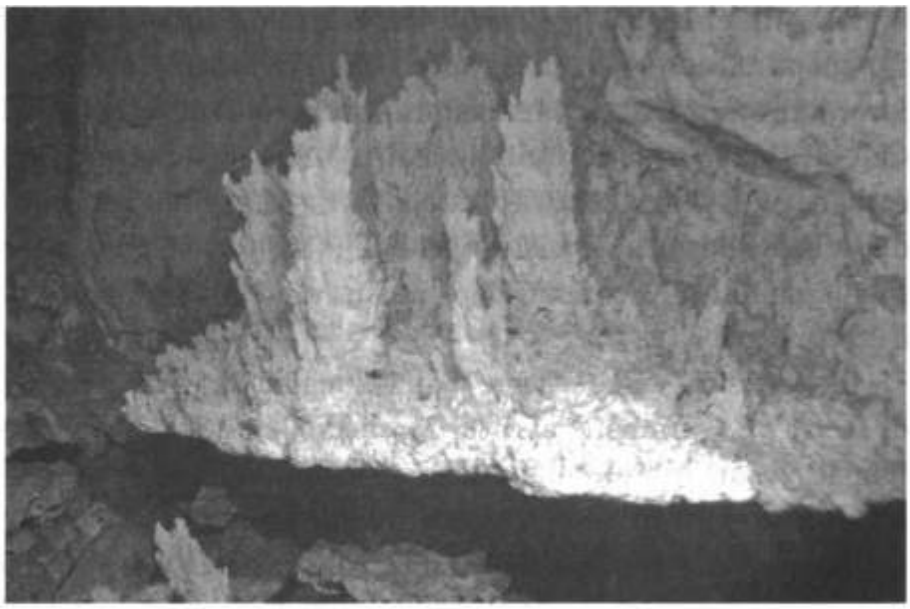


Figura 61. *Izvorul hidrotermal alcalin Orașul Pierdut prezintă un ansamblu de circa 30 de coșuri de carbonat, cu o înălțime de 30–60 metri. Fotografia înfățișează marginea unui horn care e acoperit cu depuneri de carbonat dendritic.*

În majoritatea scenariilor, hidrogenul trebuie smuls din apă sau din alte substanțe anorganice simple, cum ar fi hidrogenul sulfurat, ceea ce nu–i ușor. Izvoarele hidrotermale alcaline sunt însă printre puținele locuri de pe Pământ unde hidrogenul molecular se găsește din plin, ca produs secundar al serpentinizării. Deși cere oarecare efort, a face ca hidrogenul molecular să reacționeze cu dioxidul de carbon e totuși mult mai ușor. Și mai e ceva. Hornurile izvoarelor sunt poroase. Ele conțin un complex de micropori interconectați, cu dimensiuni de ordinul zecimii de milimetru, un fel de labirint cretan în miniatură, mult mai complicat decât și-ar fi închipuit Dedal. Porii sunt cam de 100 de ori mai mari decât o celulă vie. Se pare că avem acum toate ingredientele. Un flux continuu de hidrogen și dioxid de carbon barbotând printr-un sistem de izvoare și combinându-se pentru a produce substanțe organice mai complexe care se concentrează în porii hornurilor, iar astfel problema dispersiei e rezolvată.

Trebuie să subliniez că ipoteza originii vieții în mediul izvoarelor termale alcaline are mulți critici (în plus, cei care o susțin nu cad de acord asupra detaliilor). Repet, nu există un „model standard" al originii vieții, dar mi se pare atrăgătoare ideea generării unei game largi de substanțe organice într-un mediu care le poate capta și concentra, prin procese geotermale care au început inevitabil în scoarța oceanică a Pământului primitiv. Urmați–mă așadar, pentru a vedea unde ajungem.

Apariția unui metabolism primitiv

Dacă geochimia sistemului de izvoare hidrotermale e complet predictibilă, poate fi ea reprodusă în laborator? Și dacă poate fi reprodusă, nu cumva e posibil să obținem dovezi privind producerea moleculelor biologice fundamentale, sau chiar a protocelulelor? Răspunsul e da, iar asemenea experimente sunt în curs.[155] Mare parte din ceea ce bănuim că s-a întâmplat în primii pași către viață într-un asemenea mediu se bazează pe înțelegerea geochimiei lui, la care se adaugă cunoștințele noastre despre mecanismele biochimice folosite de microorganisme anaerobe numite acetogene și metanogene. Aceste organisme fixează carbonul din dioxidul de carbon și utilizează hidrogenul ca sursă de energie, eliberând acetat ($CH_3CO_2^-$)[156] și metan ca produse reziduale. Studii de laborator confirmă posibilitatea unor reacții chimice care ar putea fi implicate, demonstrând astfel legitimitatea abordării. Există totuși destule obiecții întemeiate.

Prima provocare e să facem ca hidrogenul molecular să reacționeze cu dioxidul de carbon. Acest lucru e posibil, dar într-un ritm prea lent pentru a sta la baza unei biochimii primitive. O soluție ar fi să apelăm la unul sau mai mulți *catalizatori,* substanțe care participă la reacție oferind o cale alternativă (ca o scurtătură de energie mai joasă), pentru a se decupla apoi, rămânând relativ neschimbați. Reacția are de asemenea nevoie de o injecție de energie – un impuls – pentru a fi inițiată.

Catalizatorii se crede că sunt minerale de fier–nichel–sulf din compoziția sistemelor de izvoare hidrotermale și a oceanelor lipsite de oxigen din tânărul Pământ.[157] Un exemplu este o formă de greigit cu impurități de nichel, Fe_5NiS_8. Nu–i o coincidență pesemne faptul că

structuri foarte asemănătoare de fier–nichel–sulf (cum este Fe_4NiS_5) se află printre catalizatorii (numiți în biochimie *enzime*) folosiți de unele bacterii anaerobe din prezent pentru a converti dioxidul de carbon în monoxid de carbon, și invers.

În ultimii 20 de ani, chimistul german Günter Wächtershäuser a adunat dovezi privind importanța mineralelor de fier–sulf și fier–nichel–sulf în originea vieții. În 1988 filosoful austriac Karl Popper l-a încurajat să–și publice teoria, numită „lumea de fier–sulf", care e în acord cu ideea că viața a început într-un sistem de izvoare hidrotermale[158], declanșând un ciclu de reacții chimice care susțin un metabolism primitiv.

Ciclul metabolic folosit de majoritatea celulelor vii de azi se numește ciclul acidului citric (sau ciclul Krebs, după biochimistul german Hans Krebs, care a descoperit acest mecanism în 1937). Organismele aerobe folosesc ciclul acidului citric pentru a oxida acetatul (din grăsimi, carbohidrați și proteine, altminteri cunoscute drept „hrană") și a produce diverse substanțe de interes biochimic, între care acelea ce pot fi convertite ușor în aminoacizi și o nucleotidă numită adenozintrifosfat (ATP), care servește drept „monedă" energetică universală, transportând energia prin celulă. Dioxidul de carbon este un produs rezidual, care e „expirat".

La acetogeni, ciclul e parcurs în sens invers, fixând carbonul din dioxidul de carbon și producând acetat. Partizanii teoriei că viața își are originea în izvoarele hidrotermale alcaline afirmă că fluxul de hidrogen și dioxid de carbon în contact cu un catalizator de fier–nichel–sulf din porii hornurilor produce o diversitate de substanțe chimice care se adună și reacționează între ele, formând o variantă primitivă a ciclului acidului citric inversat.

Termodinamica este cea care pune în mișcare acest ciclu – hidrogenul și metanul, din fluidul izvorului alcalin, și dioxidul de carbon și alte substanțe oxidante, din oceanul acid, sunt departe de starea lor de echilibru. Simplul fapt de a se afla laolaltă în aceste condiții oferă suficientă energie pentru a declanșa reacțiile. Vitezele relative ale acestor reacții („cinetica") sunt de asemenea factori importanți. Reacțiile cele mai favorizate termodinamic și cinetic ies învingătoare și încep să domine chimia din pori. Odată ce ciclul se închide, el se va

derula atâta timp cât e constant aprovizionat cu ingredientele de pornire și catalizatori. Poate că la început ciclul metabolic primitiv e ineficient, dar nu e greu de închipuit că o bună aprovizionare cu diferite substanțe și câteva sute de mii de ani de încercări și eșecuri vor produce în cele din urmă un sistem de transformări chimice relativ stabil și durabil. De pildă, acetilfosfatul ($CH_3CO_2PO_3^{2-}$) și pirofosfatul ($HP_2O_7^{3-}$) pot servi un timp drept monedă energetică, însă când ATP se alătură ciclului, ritmul se accelerează, iar ATP își intră în rol.

Există totuși o problemă. Dacă ciclul acidului citric e derulat „înainte", produce ATP, dar dacă e derulat în sens invers, *consumă* ATP. Pentru a menține ciclul invers e nevoie de o aprovizionare regulată și consistentă cu ATP. De unde provine el? ATP acționează ca monedă energetică transferându–și gruparea fosfat „activată" și eliberând energia de legătură în legătura fosfoanhidridă (P–O–P). Pierderea unei grupări fosfat produce adenozindifosfat (ADP). În celulele vii ADP e „fosforilat" înapoi la ATP, gata să–și facă din nou datoria.

Există câteva mecanisme biochimice pe care celulele vii le folosesc în acest scop, dar unul dintre cele mai importante implică *chemiosmoza.* Reacțiile biochimice produc un gradient electrochimie, în care o regiune cu densitate scăzută de protoni (H+) e separată de o regiune cu o concentrație ridicată de protoni printr-o membrană, cam la fel ca la separarea sarcinilor electrice dintr-o baterie. Membrana e semipermeabilă, iar atunci când protonii se „scurg" din regiunile cu concentrație ridicată în cele cu concentrație scăzută, aceștia declanșează reacția dintre ADP și fosfatul anorganic, producând ATP.

În timp ce lucra cu colaboratorii săi Allan Hall și Roy Daniel în 1993 (înainte de a descoperi Orașul Pierdut), Russell a emis ipoteza că mediul submarin al unui izvor hidrotermal alcalin dintr-un ocean, devenit acid prin dioxidului de carbon dizolvat, poate oferi un gradient electrochimic natural. Când dioxidul de carbon este dizolvat în apă, el reacționează pentru a produce acid carbonic (H_2CO_3), care își cedează ușor atomii de hidrogen sub formă de protoni, rezultând ioni de bicarbonat (HCO_3^-) și de carbonat (CO_3^{2-}). Un ocean saturat cu dioxid de carbon are deci o concentrație ridicată de protoni. Dimpotrivă,

fluidul ieşind dintr-un izvor este puternic alcalin – are o concentraţie scăzută de protoni. Russel şi Hall au susţinut în 1997 că gradientul rezultant poate declanşa reaprovizionarea cu pirofosfat (iar apoi cu ATP) în porii hornului, menţinând astfel ciclul primitiv invers al acidului citric.

Dacă e adevărat, atunci porii din hornuri devin minuscule combinate chimice. Hidrogenul şi dioxidul de carbon, la care se adaugă pesemne metanul, curg prin pori dizolvaţi în fluidul izvorului, iar acolo reacţia lor e catalizată de sulfurile de fier–nichel. Se acumulează o mare varietate de substanţe organice simple, iar în cele din urmă se stabileşte un ciclu metabolic primitiv, alimentat de gradientul electrochimic dintre ocean şi fluidul din izvor, care converteşte ADP-ul înapoi în ATP. Pe măsură ce se derulează ciclul, concentraţia substanţelor organice creşte. Aceste substanţe se combină într-o serie de reacţii chimice pentru a produce aminoacizi, apoi nucleotide formate din unităţi de riboză, fosfat anorganic, purine şi pirimidine.

Oricine are experienţa lucrărilor de laborator de chimie organică a avut pesemne ocazia să se simtă profund dezamăgit: în loc de „pulberea anhidră albă" care ar trebui să fie produsul de sinteză, rămâi cu o mâzgă vâscoasă şi lipicioasă.[159] Dacă nu sunt atent supravegheate, substanţele organice par să aibă tendinţa înnăscută de a se comporta astfel. De vreme ce în microporii hornurilor e produsă o bogăţie de compuşi organici, este deci de aşteptat ca suprafeţele porilor să fie rapid acoperite cu „mâzgă". Probabil că în această mâzgă există o clasă de molecule care apar în mod natural, numite lipide. Ele sunt formate din catene lungi de carbon şi hidrogen, flancate de grupări terminale active, cum ar fi $–CO_2H$ (acizi graşi). În subclasa numită *fosfolipide,* catenele lungi sunt unite prin grupări de fosfat intermediare. Asemenea substanţe servesc drept „cărămizi" pentru membranele celulelor, şi vor deveni importante către sfârşitul poveştii despre originea vieţii. Dar ce se întâmplă mai departe?

Ascensiunea irezistibilă a ARN-ului

Simulările pe calculator susţin ideea că gradienţii de temperatură dintre fluidul cald al izvoarelor şi apa rece din ocean determină acumularea nucleotidelor produse în porii hornurilor. Pentru ceea ce se

întâmplă mai departe în celulele vii e nevoie în genere de o enzimă, dar avem motive întemeiate să credem că, deşi cu eficienţă mai mică, se poate întâmpla şi spontan. Nucleotidele *polimerizează* – se înşiră ca mărgelele,

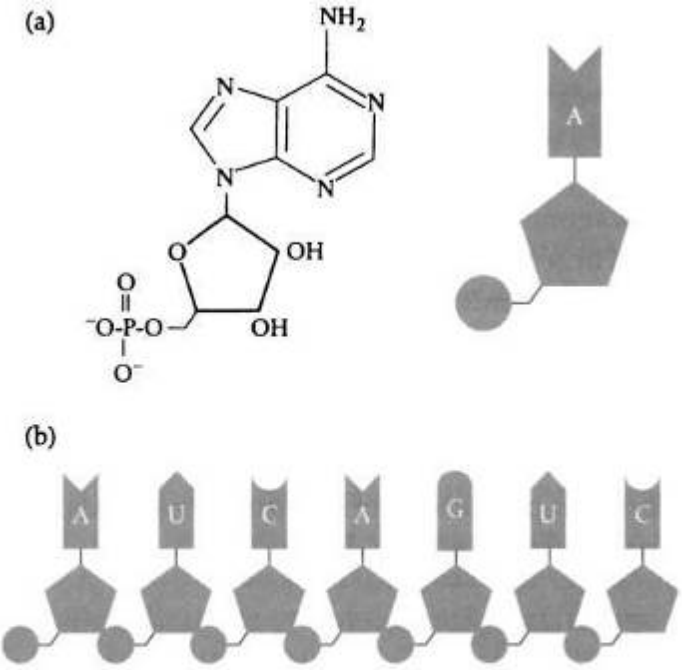


Figura 62. *Pentru a simplifica reprezentarea structurilor moleculare complexe din chimia vieţii, le-am înlocuit cu forme geometrice simple pentru diferitele subunităţi. De pildă, în (a) riboza adenonzin monofosfatului e reprezentată printr-un pentagon, iar unitatea fosfat printr-un cerc. Baza adenină are o formă specială, pentru a o deosebi de guanină, uracil şi citozină. Când se acumulează în cantităţi suficiente, nucleotidele polimerează pentru a forma ARN (b).*

unitatea fosfat a uneia legându-se de gruparea hidroxil din unitatea riboză a vecinei.

Aceste molecule sunt deja complicate, deci avem nevoie de un mod simplificat de a le reprezenta. În figura 62(a) am răsucit adenozin monofosfatul (AMP) aşa încât unitatea de bază să fie în sus. Diferitele subunităţi alcătuind AMP apar schematic în dreapta: riboza ca un pentagon, fosfatul ca un cerc. Există patru baze azotate care, din motive ce se vor lămuri imediat, sunt reprezentate prin forme diferite şi sunt notate cu A, G, U şi C (adenină, guanină, uracil şi citozină).

O scurtă secţiune a polimerului rezultat (AM) apare în figura 62(b), folosind acest mod simplificat de ilustrare a diferitelor subunităţi.

Legăturile riboză–fosfat formează un fel de „coloană vertebrală” a structurii. Deși în figură scurta secțiune e reprezentată liniar, în realitate formele orbitalilor moleculari implicați și geometria rezultată fac ca polimerul să se arcuiască într-o spirală, bazele fiind orientate în interior, spre ax. Formă spirală poartă numele de *helix.*

Avem acum de-a face cu ceea ce cred că e cea mai subtilă manifestare a forței electromagnetice. Structurile purinelor și pirimidinelor prezintă o remarcabilă complementaritate. Orbitalii moleculari asociați fiecărei legături N–H din gruparea $–NH_2$ a adeninei nu sunt uniform distribuiți. Atomul central de azot are tendința să acapareze electronii, lăsând atomii de hidrogen fără ce li se „cuvine”, așa încât orbitalii moleculari rezultați lasă ușor expuse nucleele atomilor de hidrogen (formate dintr-un singur proton) încărcate pozitiv.

În capitolul 5, când am vorbit despre orbitalii moleculari ai atomului de oxigen, am conchis că cei patru electroni care nu sunt implicați în legătură formează „perechi singuratice” de orbitali. În molecula de apă (H_2O), perechile singuratice formează doi lobi laterali. Cam același lucru se întâmplă cu gruparea carbonil (–C=O) a uracilului. Perechile singuratice ies în afara atomului de oxigen ca lobi cu sarcină negativă. E ușor de bănuit ce urmează. Atomul de hidrogen ușor pozitiv din gruparea amino a adeninei se leagă de perechea singuratică de electroni a atomului din gruparea carbonil a uracilului. Rezultatul este o *legătură de hidrogen,* care e mult mai slabă decât legăturile chimice convenționale, fiind de regulă reprezentată printr-o linie punctată.

Când adenina întâlnește uracilul, se formează două legături de hidrogen între bazele azotate, după cum se vede în figura 63. Aceste legături de hidrogen depind de compoziția și geometria moleculelor implicate. De pildă, putem forma o legătură de hidrogen între gruparea amino a adeninei și gruparea carbonil a citozinei, dar nu putem forma încă o legătură, prin urmare această combinație de baze e mai puțin stabilă.

De fapt, cele patru baze azotate formează două *perechi de baze.* Adenina se cuplează cu uracilul, iar guanina cu citozina, așa cum se vede în figura 63. Dacă privim atent structurile celor două perechi, observăm că sunt foarte asemănătoare. Singura diferență e că gruparea amino a guaninei și gruparea carbonil a

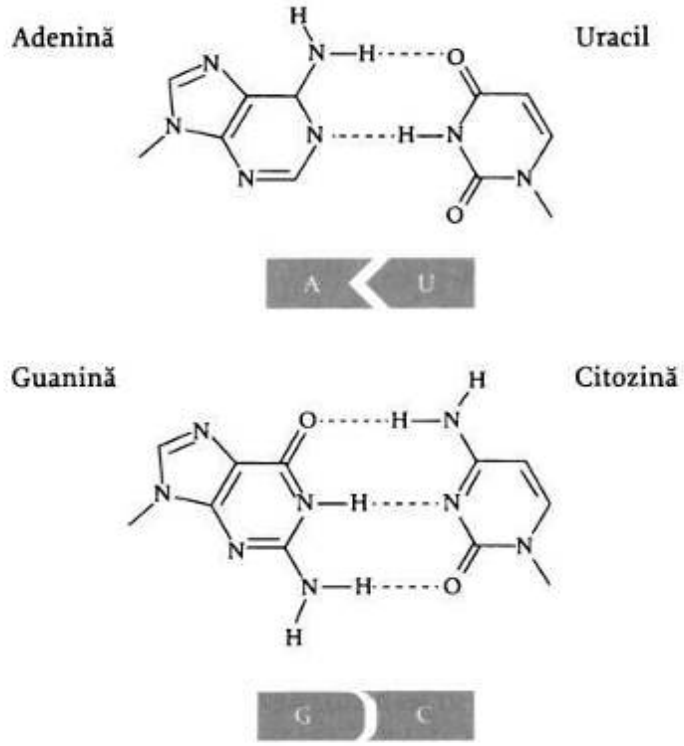


Figura 63. *Electronii orbitalilor moleculari ai grupării amino (—NH2 and N—H) din purine şi pirimidine sunt împărţiţi inegal, lăsând atomii de hidrogen cu o sarcină uşor pozitivă. Aceştia se leagă de perechile de electroni singuratici ai atomilor de oxigen din grupările carbonil şi de atomii de azot din inel, pentru a forma legături de hidrogen. Deşi sunt mult mai slabe decât legăturile chimice obişnuite, sunt suficiente pentru a menţine laolaltă structurile.*

citozinei formează o a treia legătură de hidrogen.[160] Înţelegeţi acum de ce am reprezentat cu forme diferite bazele azotate în figura 62. Aceste forme arată că A se împerechează cu U, iar G cu C.

Lucrurile devin cu adevărat interesante. Odată asamblată, o catenă AM îşi poate cataliza propria–i replicare. Ea adună nucleotide libere, aliniind A cu U, U cu A, G cu C şi C cu G. Aduse la distanţe mici, nucleotidele polimerizează (figura 64), formând altă catenă AM ca un fel de negativ fotografic al celei iniţiale. Secvenţa bazelor azotate din catena iniţială (de pildă, AUCAGUCCGAUC... din care primele şapte apar în figura 64) produce un negativ (UAGUCAGGCUAG...). Legăturile de hidrogen care menţin împreună aceste două catene sunt destul de slabe şi se pot rupe uşor. Odată separate catenele, negativul poate asambla altă catenă, care o copiază pe cea iniţială.

Producţia de AM a devenit *autocatalitică.* O catenă produce două. Două catene produc patru. Patru catene produc opt. Vă puteţi da seama de puterea acestei dublări dacă vă închipuiţi că aşezaţi o monedă pe pătratul din dreapta sus al unei table de şah, apoi două monede pe următorul pătrat, şi tot aşa până acoperiţi întreaga tablă de şah. Cât de înalt credeţi că va fi turnul de pe al 64-lea pătrat? Ei bine, el va avea aproximativ 264 monede sau circa 18 miliarde de miliarde. Să presupunem că fiecare monedă are o grosime de doi milimetri. Turnul de pe pătratul 64 va avea înălţimea de circa 37 de mii de miliarde de kilometri.

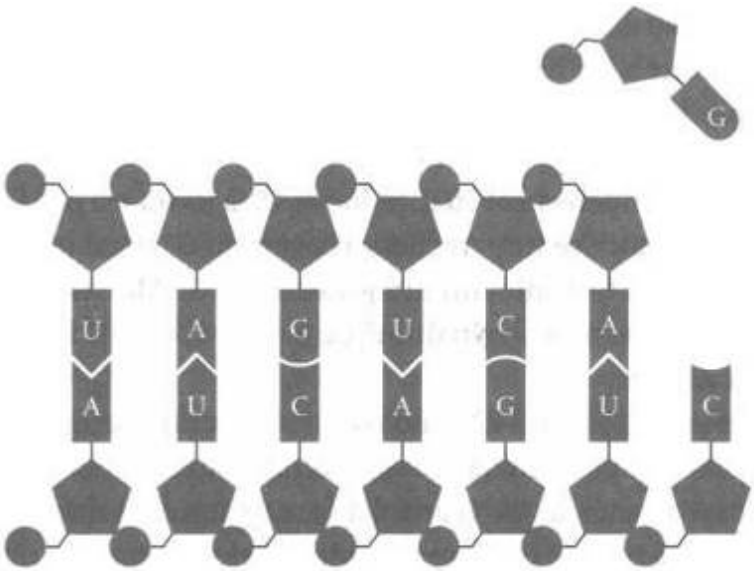


Figura 64. *Legăturile de hidrogen dintre perechile de baze complementare permit unei catene ARN să asambleze un fel de negativ fotografic al ei înseşi, în care A e inlocuit cu U, C cu G etc. Când cele două catene se separă, negativul poate asambla un alt pozitiv. Astfel, o catenă ARN poate cataliza propria-i replicare.*

Chiar dacă producţia de AM e iniţial lentă şi ineficientă, odată amorsată, nu există cale de întoarcere. Presupunând că – dintr-un accident sau dintr-un capriciu al termodinamicii şi cineticii – ARN-ul este format din D–enantiomeri ai nucleotidelor (aşa încât helixul se răsuceşte doar într-un singur sens), atunci aceasta e forma amplificată prin replicare, şi va deveni repede dominantă.

Lumea ARN

Aşa cum în analogia cu tabla de şah nu veţi ajunge la pătratul 64, fiindcă aveţi resurse financiare limitate, capacitatea ARN-ului de a se replica

depinde de rezerva de nucleotide libere din care să–şi asambleze cópii. Când resursele moleculare se epuizează, replicarea încetează. ARN-ul produs ar putea să nu apară de la început ca o unică structură moleculară, cu un număr de baze azotate şi o succesiune a lor fixate. De fapt, catene de AM e mai probabil să fie produse cu diferite lungimi şi succesiuni de baze azotate. Apoi, mecanica replicării nu e infailibilă. Dacă, de pildă, A este „accidental" împerecheat cu C, în loc de U, la formarea negativului, iar C din negativ se împerechează corect cu G, atunci în această „replicare" A a fost înlocuit din greşeală cu G. ARN-ul rezultat e o versiune *mutantă* a originalului, cu o mică diferenţă în secvenţa bazelor azotate.

Aceste variaţii ale ARN-ului *concurează* pentru resursele disponibile – o competiţie doar în sensul termodinamicii şi cineticii chimice. Varianta de AM capabilă să reacţioneze mai rapid şi mai uşor cu nucleotidele libere se va replica în detrimentul variantelor care n–o pot face. În timp, varianta de AM mai „aptă" va deveni dominantă, celelalte fiind ameninţate cu „dispariţia". Iată un exemplu de evoluţie darwinistă la nivel molecular. Pare incredibil? Vreau să subliniez că acest mecanism de replicare a ARN-ului nu înseamnă încă viaţă, ci e doar o chimie complexă care, conform versiunii poveştii pe care o urmărim, are loc în microporii hornurilor din sistemele de izvoare hidrotermale alcaline. Însă aceasta e o chimie care în principiu se poate desfăşura oriunde, de pildă în eprubetele unui laborator.

În 1967, biochimistul american Sol Spiegelman şi colegii săi de la Departamentul de Microbiologie al Universităţii Illinois din Urbana au demonstrat că ARN-ul separat dintr-un virus gazdă se va replica dacă i se oferă ingredientele chimice şi enzima potrivită. Ei au permis replicării să „incubeze" timp de 20 de minute, înainte de a transfera un mic eşantion într-o soluţie proaspătă, repetând procesul de 75 de ori şi reducând perioada de incubaţie pentru a menţine o presiune selectivă în favoarea ARN-ului care se replichează cel mai repede. Aceste condiţii neobişnuite au încurajat ARN-ul să evolueze într-o formă care se replica rapid. Păstrând constanţi toţi ceilalţi factori, lungimea catenei de AM s-a redus sistematic, deoarece (logic) ARN-ul scurt se replichează mai repede decât cel lung. ARN-ul iniţial avea circa 4500 de baze azotate. După 74 de generaţii, ARN-ul evoluat avea doar 218. La acea vreme, era

cea mai mică entitate chimică autoreplicatoare cunoscută, şi a fost botezată „monstrul lui Spiegelman”.

Fascinanta chimie a acestei „lumi AM” a fost explorată prin experimente extrem de ingenioase. Nu avem ocazia să vorbim despre ele, dar unul merită menţionat. În 2009, Gerald Joyce şi Sarah Voytek, de la Institutul de Cercetare Scripps din California, au arătat că atunci când două forme de AM concurează pentru unele resurse chimice ca să se reproducă, ARN-ul favorizat termodinamic şi cinetic va câştiga în cele din urmă, provocând extincţia celuilalt. Dacă însă lărgim gama resurselor chimice, cele două forme de AM evoluează într-un mod care le permite să coexiste, fiecare consumând un subset diferit de ingredienţi disponibili. Aceasta e „ecologia moleculară”. Fiecare formă de AM se adaptează pentru a supravieţui în propria ei „nişă ecologică”, unde se poate replica mai departe fără competiţie.

Mai trebuie luat în considerare un aspect. Erorile aleatorii care apar la replicarea ARN-ului pot produce mutanţi care sunt favorizaţi termodinamic şi cinetic, se replichează mai eficient şi câştigă competiţia pentru ingredienţi chimici. Ne-am putea imagina că, în timp, sistemul conduce la o singură formă de AM cu o anumită secvenţă de baze azotate, cel mai bine adaptată condiţiilor, iar toate celelalte forme dispar. Simulările pe calculator din anii 1970 ale laureatului Nobel Manfred Eigen şi ale chimistului Peter Schuster arătau însă altceva. În loc să se observe evoluţia către o singură formă de AM, rezultatul presiunii chimice selective e o gamă sau o *populaţie* de forme AM, având secvenţe ale bazelor azotate strâns înrudite cu secvenţa de succes maxim.

Codul genetic

După cum am văzut, ipoteza livrării exogene şi cea a supei primordiale se concentrează asupra producerii de aminoacizi în condiţiile prebiotice ale Pământului primitiv. În scenariul „mai întâi metabolism”, începem prin a construi un metabolism primitiv, din care apare lumea replicării AM şi a evoluţiei moleculare. E momentul să între în scenă aminoacizii.

În descrierea lumii AM, am acordat puțină importanță *secvenței* bazelor azotate. Ea este aleatorie, dar un set ulterior de interacții chimice va da secvenței o semnificație cu consecințe profunde când sunt aplicate presiunile selective, pentru că secvența bazelor azotate codifică diferiți aminoacizi în producerea proteinelor. Procesul prin care ARN-ul face asta în celulele vii e acum bine înțeles, însă pesemne că acest mecanism e rezultatul a milioane de ani de evoluție chimică, și nu reflectă neapărat felul în care a apărut procesul în chimia prebiotică.

Putem merge mai departe cu speculațiile, bazându–ne pe ceea ce știm. Fiecare dintre cele patru baze azotate ale ARN-ului, A, U, G și C, are o afinitate chimică (ceea ce se traduce prin „codifică") pentru anumiți *precursori* ai aminoacizilor. După cum o arată numele, aceștia nu sunt aminoacizi, ci moleculele din care sunt alcătuiți aminoacizii. Aduceți–vă aminte că ciclul invers al acidului citric, care se desfășoară în porii hornurilor, produce, între altele, precursori ai aminoacizilor.

Un singur precursor poate fi folosit la construirea mai multor aminoacizi. O a doua bază azotată vecină specifică apoi natura conversiei. De pildă, în combinația GE, baza azotată G specifică precursorul piruvat ($CH_3COCO_2^-$, produs în ciclul invers al acidului citric), iar C specifică transformarea lui în alanină printr-un proces de „aminare reducătoare", în care gruparea carbonil din mijloc e modificată prin adăugarea unei grupări amino. Prin combinarea a două litere de cod dintr-un „alfabet" cu patru litere putem obține doar opt combinații diferite. Formarea perechilor din patru baze azotate poate deci codifica doar producerea a opt aminoacizi, însă există 20 în biochimia pe care o cunoaștem azi. Ce se întâmplă?

Răspunsul scurt este că, de fapt, codul e format din *trei* baze azotate. În principiu, un cod de trei litere poate genera 64 de combinații, dar în a treia literă e înglobată multă redundanță. De pildă, toate combinațiile GEU, GEC, GEA și GEG codifică alanina. Asemenea combinații sunt numite *codoni* și formează baza informației genetice pentru toate formele de viață. Acest *cod genetic* e rezumat în figura 65.

Nu e dar de ce codul s-a extins la o treia literă, din moment ce majoritatea informației utile chimic se află în primele două. Probabil că presiunea selectivă a favorizat un sistem capabil să producă o gamă mai

largă de aminoacizi. Poate că termodinamica, cinetica și geometria moleculară au jucat și ele un rol important.

În sistemele biologice de azi, un aminoacid se conectează cu un codon AM printr-o moleculă adaptoare. Aceasta e tot o moleculă de AM, numită ARN de transfer (ARNt), dar mult mai scurtă, formată din vreo 73–94 de baze azotate. Pentru a evita confuzia, vom numi catena lungă de AM, cea care conține secvența codonilor, AM mesager (ARNm). Semnificația acestei denumiri va fi curând lămurită.

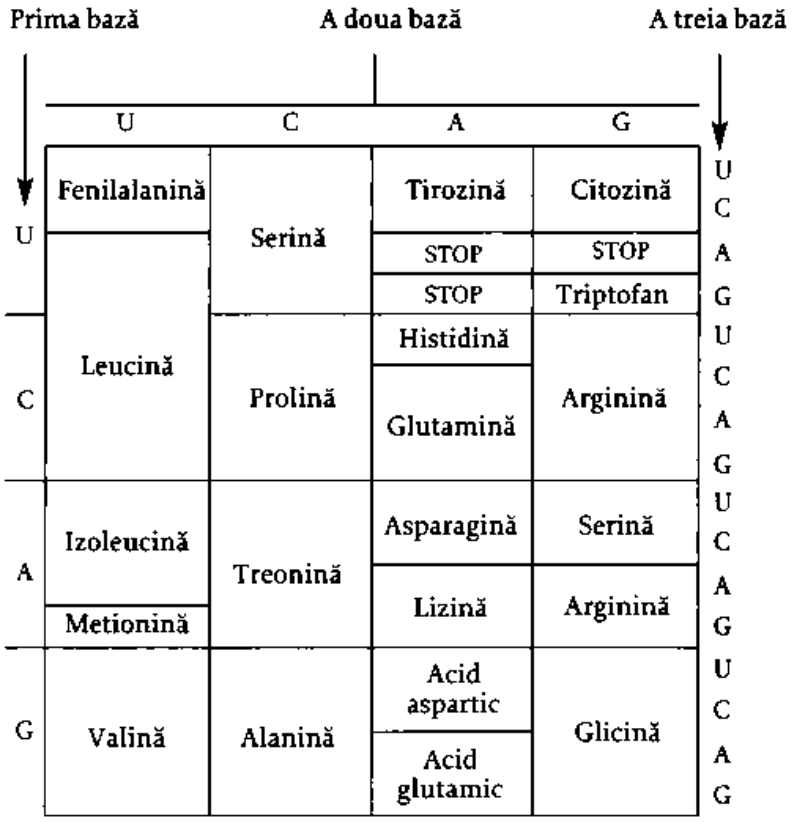


Figura 65. *Codul genetic. Secvențele de trei baze azotate din ARN, numite* codoni, *specifică secvența aminoacizilor care vor fi asamblați pentru a alcătui proteine. În cod există multă redundanță, mai mulți codoni diferiți specificând aceiași aminoacizi.*

ARN-ul de transfer prezintă câteva bucle, o structură acceptoare care se leagă de aminoacid și un braț anticodon, care conține o secvență de trei baze azotate, complementare codonului din ARNm. De exemplu, anticodonul pentru GEU este CGA. ARN-ul de transfer cu acest codon se va lega de alanină.

Secvența codonilor de trei litere din catena de ARNm adună laolaltă o secvență de aminoacizi aflată pe structurile acceptoare din ARNt (figura 66). Aminoacizii pot acum polimeriza, formând între ei așa–numitele legături peptidice (–CO–NH–). Când e întâlnit pentru prima oară, codonul AUG (care de asemenea codifică metionina) indică *începutul* procesului de polimerizare. Codonii UAA, UAG și UGA indică *sfârșitul* procesului. Rezultatul final e o moleculă de proteină, secvența de codoni din ARNm determinând secvența de aminoacizi din proteină. La rândul ei, această secvență determină proprietățile și geometria moleculară a proteinei, felul în care se va „înfășură" într-o structură tridimensională unică.

Poate că lucrurile nu s-au desfășurat chiar așa în sistemele chimice din porii hornurilor, dar fără îndoială acesta e un imens pas înainte. Proteinele sunt molecule omniprezente în organismele vii, îndeplinind o gamă largă de funcții biochimice. Între altele, acționează ca enzime și transportă prin celulă anumite molecule. Asamblarea proteinelor deschide acum noi posibilități de evoluție, multe dintre ele putând face mai eficient procesul replicării ARN-ului.

Noul sistem chimic începe să ia amploare, iar producerea de proteine îl plasează ferm în domeniul biochimiei. Presiunile selective modelează acum nu numai ARN-ul, ci întregul sistem chimic din porii

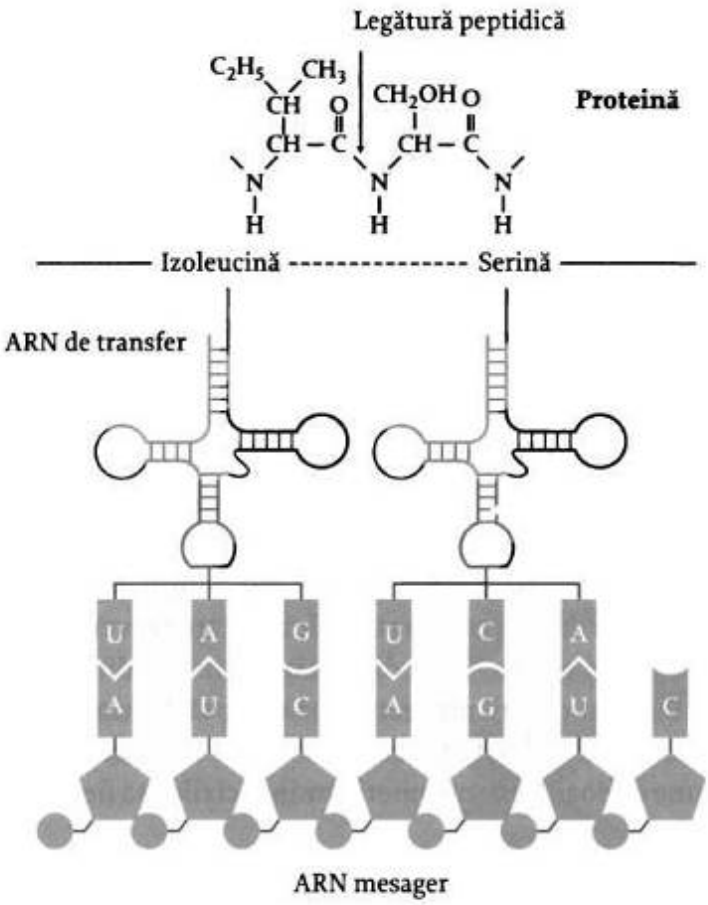


Figura 66. *Fiecare codon de ARN mesager se leagă de un anticodon corespunzător de pe braţul anticodon al ARN-ului de transfer (în figură nu apare la aceeaşi scară). De pildă, codonul AUC se leagă de anticodonul UAG. Din codul genetic din figura 65 ştim că AUC codifică aminoacidul izoleucină, care se leagă de structura acceptoare al ARN-ului de transfer. Următorul codon AGU codifică serina. Când aminoacizii se aliniază, ei încep să polimerizeze, formând între ei legături peptidice. Secvenţa de aminoacizi determină proprietăţile şi geometria moleculară a proteinei rezultate.*

hornurilor. Populaţia de secvenţe AM care se replichează cu cel mai mare succes va deveni dominantă, iar acum succesul ţine şi de spectrul proteinelor pe care secvenţa le poate produce. Şi mai e ceva. Dacă din întâmplare sau din necesitate chimică D–enantiomerii nucleotidelor ajung să domine replicarea ARN-ului, atunci geometria rezultantă a ARN-ului poate, la rândul ei, impune ca doar L–enantiomerii aminoacizilor să fie asamblaţi în proteine.

Inventarea ADN-ului

Secvenţa de baze azotate din ARN a dobândit o importanţă uriaşă, numai că molecula de ARN e destul de vulnerabilă, expusă mutaţiilor

care pot conduce la o secvență nefavorabilă, afectându–i capacitatea de replicare. Avantajul evolutiv este de partea sistemul chimic care găsește o cale de a–și păstra secvența de baze azotate din ARN. Soluția este ADN-ul. În linii mari, nu–i mai greu să construiești o catenă de ADN decât una de ARN. Deoxiriboza înlocuiește riboza, ceea ce face ca acidul nucleic rezultant să fie mai puțin expus la reacțiile cu apa. De asemenea, timina înlocuiește ca bază pirimidinică uracilul, față de care are în plus doar o grupare $-CH_3$ (vezi figura 60).

Deși acest pas este ieșit din comun, există un exemplu modern. Retrovirusurile, între care și virusul HIV, folosesc o enzimă numită reverstranscriptază pentru a asambla ADN-ul din ARN. Odată ce secvența optimă de baze azotate a fost translatată într-una din catenele helicoidale ale ADN-ului, ea se împerechează cu baza azotată complementară pentru a forma celebra structură dublu helicoidală (figura 67). Secvența de codoni deținută înainte de ARN este acum mult mai bine protejată.

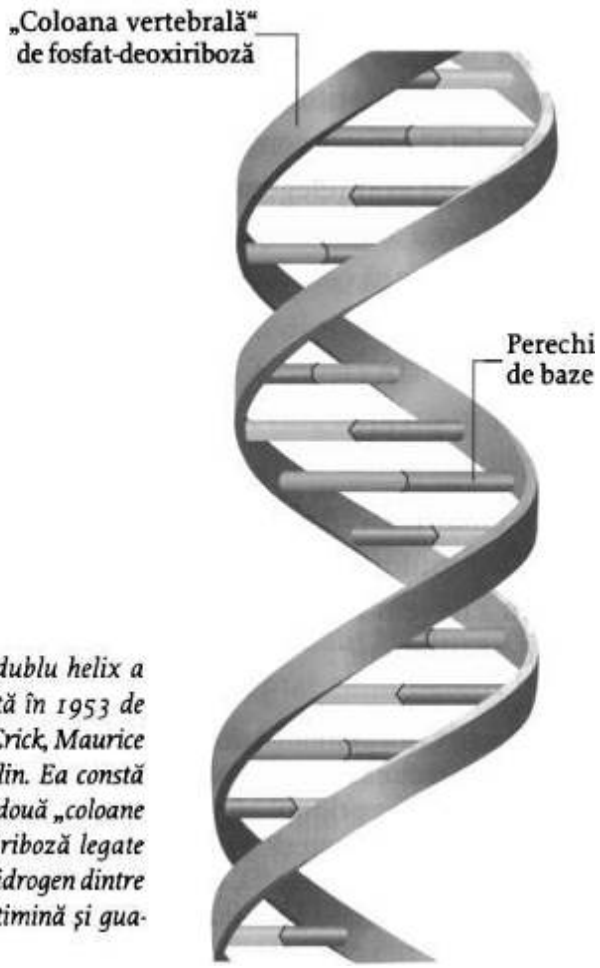


Figura 67 *Structura de dublu helix a ADN-ului a fost descoperită în 1953 de James D. Watson, Francis Crick, Maurice Wilkins și Rosalind Franklin. Ea constă în două spirale formate de două „coloane vertebrale“ de fosfat-deoxiriboză legate între ele prin legăturile de hidrogen dintre perechile de baze adenină-timină și guanină-citozină.*

ADN-ul se poate replica pe cont propriu destul de ușor (cu ajutorul enzimelor potrivite). Cele două catene ale dublului helix se separă, formând un „pozitiv” și un „negativ” complementare. Pozitivul asamblează un negativ, iar negativul un pozitiv. Dintr-o moleculă de ADN obținem două. Apoi patru. Apoi opt. Și așa mai departe.

Construirea proteinelor devine acum mai complicată. ADN-ul își transcrie secvența de baze azotate într-o catenă de ARNm printr-o serie de pași biochimici. Apoi, după cum am văzut, ARNm oferă matrița pentru asamblarea proteinelor. Acesta e motivul pentru care îl numim AM „mesager”: poartă „mesajul” codului genetic de la ADN la sistemul chimic folosit pentru sintetizarea proteinelor. Aceasta e „dogma centrală” a biologiei moleculare.[161] Informația genetică circulă în general de la ADN la ARN și la proteine.

Sistemele care se dezvoltă cu succes în porii hornurilor se pot extinde sau pot „infecta” porii învecinați. Se dezvoltă astfel o „comunitate” înfloritoare. Am trecut oare un prag evolutiv? Putem numi „viață” această comunitate de sisteme chimice care se replichează? Fără să înțelegem ce este viața e greu de dat un răspuns tranșant, însă toate componentele dispozitivului chimic din ceea ce vom ajunge să considerăm a fi sisteme vii funcționează deja.

Nașterea lui LUCA

Ei, nu chiar toate. Avem de-a face cu o comunitate care rămâne ferm (dar confortabil) închisă în pântecul microporilor din horn. Pentru a deveni viața așa cum o știm noi, trebuie să–și găsească o cale de a se „naște”.

Să continuăm exercițiul de imaginație. Pe măsură ce porii se umplu cu substanțe chimice care se ocupă cu metabolismul și replicarea, e ușor de închipuit că aceste sisteme chimice ajung în criză de resurse. Se pierd pesemne populații întregi, componentele esențiale ale dispozitivului lor chimic fiind dispersate în oceanul neîndurător. Molecule de proteine sau lipide vin acum în ajutorul lor. Lungile catene de carbon și hidrogen din fosfolipide se comportă ca uleiul – sunt „hidrofobe” (nu le place apa) și nu se amestecă bine cu apa. Dimpotrivă, gruparea fosfat e „hidrofilă” (îi place apa). Grație efectelor termodinamicii, fosfolipidele alcătuiesc un *strat dublu, o* structură de sandviș în care catenele hidrofobe se găsesc la mijloc, protejate împotriva apei de grupările hidrofile din exterior, aflate în contact cu apa. Rezultatul e o *membrană* care menține laolaltă sistemul chimic, formând o celulă.

Mai sunt însă multe de făcut. Presiunile selecției moleculare au condus la evoluția unei populații de sisteme care depinde de câteva „trucuri” chimice pentru a supraviețui. Unele dintre ele nu mai sunt accesibile celulei, iar mediul schimbător selectează celulele capabile să reproducă sau să simuleze aceste trucuri. De pildă, gradientul electrochimic natural dintre ocean și fluidul izvoarelor, care se crede că determină conversia ADP-ului înapoi în ATP, se pierde când peretele celulei devine impermeabil la mișcarea ionilor de H^+. Lipsite de energie, aceste celule vor dispărea.

Dar asta nu se întâmplă imediat, iar celulele care pot dezvolta o soluție alternativă își vor spori șansele de supraviețuire. Într-un articol publicat în 2012, pe baza analogiei cu biochimia bacteriilor metanogene și acetogene, Nick Lane și William Martin au lansat ipoteza că aceste protocelule s-au adaptat când pereții lor au devenit impermeabili.[162] Ei au susținut că pereții protocelulelor ar fi fost la început impermeabili la ionii pozitivi mai mari, cum e cel de sodiu (Na+). Aceasta oferea avantaje selective celulelor care și-au dezvoltat un transportor simplu de proteine – numit *antiporter* – care scoate ionii de Na^+ din celulă, dar ionii de H^+ continuă să se scurgă înăuntru. Acest mecanism cuplează diferite tipuri de ioni și creează un gradient electrochimie bazat pe Na^+ din celulă. Când pereții celulei s-au izolat în cele din urmă și au devenit impermeabili la ionii de H^+, celulele care își dezvoltaseră acest truc puteau supraviețui pe seama gradienților lor de Na+, continuând producția de ATP și dobândindu–și independența. Ele sunt acum libere să părăsească porii hornurilor.[163]

Mai urmează încă multe provocări. Când celulele se îndepărtează de sistemele izvoarelor care le-au dat naștere, ele nu mai au acces la prețioasa sursă de hidrogen molecular de care au nevoie pentru fixarea carbonului din dioxidul de carbon, cât și pentru metabolism și creștere. Încă o dată, mediul schimbător va favoriza o populație de celule adaptate pentru a extrage hidrogenul din alte surse.

Deși nu cunoaștem exact natura biochimiei sale, putem să-i urăm bun venit în lume lui LUCA. De la acest *procariot* (organism format dintr-o singură celulă simplă) primitiv decurge întreaga viață de pe Pământ. Nu contează dacă acceptați o teorie bazată pe livrarea exogenă, pe supa primordială, pe izvoarele hidrotermale (sau o combinație a lor – ele nu se exclud reciproc) ori alte scenarii pe care n-am avut ocazia să le pomenesc. Concluzia pe care o putem trage din toate aceste abordări este că producerea „cărămizilor" vieții pare să fie o consecință naturală și inevitabilă a chimiei de pe o planetă stâncoasă, cu apă lichidă. Viața pe Pământ e adânc înrădăcinată în compoziția și proprietățile acestei planete, în condițiile existente pe ea.

Șirul de evenimente prezentat aici – de la metabolism primitiv, la lumea ARN, la sinteza proteinelor, la ADN și la structurile celulare – e aprig

dezbătut de cei care se ocupă de originea vieții. Poate că evenimentele nu s-au desfășurat în acest fel și nici măcar în această ordine. Dar indiferent cum s-au desfășurat, tranziția de la „cărămizile" vieții la moleculele importante biologic – ATP, ADN, ARN și proteine – pare inevitabilă. Nu sunt chiar atât de multe trucuri biochimice, iar timpul e suficient de lung pentru a le găsi prin încercări și eșecuri. S-ar părea că principiile evoluției prin selecție naturală funcționau deja la nivel molecular în chimia sistemelor care luau naștere.

Multe lucruri rămân nelămurite, mai avem multe de aflat, dar putem concepe un plauzibil scenariu incomplet. Rămânem cu presupunerea că, în urmă cu vreo patru miliarde de ani, un sistem chimic complex evoluând în acest mod a depășit un prag critic și a căpătat viață. Lumea s-a transformat ireversibil.

9. Simbioza

Originea celulelor complexe și a organismelor pluricelulare

Indiferent cum s-a petrecut, abiogeneza a schimbat toate regulile. Secvența de baze azotate din ADN, transcrierea ei prin ARN și rolul ei în construirea proteinelor ne obligă să apelăm la un alt limbaj. Acest limbaj se întemeiază încă pe termodinamica și cinetica chimică – energiile și vitezele reacțiilor chimice complexe –, dar se referă la un nivel de structură și organizare care se află deasupra chimiei. Este limbajul genelor și al eredității. Pentru următorul episod din povestea științifică a creației e nevoie să ne familiarizăm cu câțiva dintre termenii lui de bază.

Întreaga secvență de baze din ADN-ul unui organism se numește *genom.* Gena se definește ca o secțiune din genom care contribuie la o anumită proprietate sau trăsătură biologică ereditară, un fel de „unitate de ereditate". Genele nu sunt ca aplicațiile unui telefon inteligent („avem o genă pentru cutare lucru"), așa cum apar uneori prezentate în literatura de popularizare. Viața e mult mai complicată. Trăsăturile biologice sunt determinate de acțiunea mai multor gene,[164] unele putând juca mai multe roluri.

Ansamblul particular de gene al unui organism, sau secvența sa de gene, determină ce set de proteine va fi construit, deci ce tip de organism este, cum va avea loc metabolismul, creșterea și replicarea lui. Știm deja că o catenă de ADN are o structură de dublu helix, după cum au descoperit Watson, Crick, Wilkins și Franklin în 1953, dar în organismele vii ADN-ul capătă forme geometrice la scară mai mare, numite *cromozomi.* La procariote, cromozomul se încolăcește în cerc, cele două „capete" ale moleculei fiind unite, ceea ce îl face mai puțin expus atacului chimic.[165]

Putem acum descrie în linii mari structura unei celule procariote. Cromozomul circular formează un *nucleoid* care plutește liber în citoplasma celulei, compusă din aproximativ 80% apă, câteva săruri anorganice și molecule organice. Din loc în loc în citoplasmă se află *ribozomii,* mici „uzine" moleculare unde ARNm se translatează în proteine pe baza codului genetic. Celula e înconjurată de o membrană cu un strat dublu de fosfolipide, care conține de asemenea unele proteine.

Genele sunt transmise generațiilor succesive ale organismului prin replicarea ADN-ului cromozomial. La celulele procariote procesul are loc prin *diviziune celulară.* Primul pas este replicarea cromozomului circular pentru a obține o copie identică. Cele două copii ale cromozomului se separă în celulă și se îndepărtează una de alta. Celula crește, iar membrana formează două compartimente separate, fiecare cu câte un cromozom și un set complet de ribozomi, producând astfel două celule „fiice" genetic identice.

Dacă întreaga viață de pe Pământ descinde într-adevăr din populația de protoorganisme procariote care au apărut cu vreo patru miliarde de ani în urmă, și pe care le numim LUCA, atunci teoretic ar trebui să găsim dovezi ale acestei obârșii în toate formele de viață de pe Pământ. Desigur, mutațiile aleatorii și evoluția acționând în miliarde de ani au transformat natura și în mod special diversitatea formelor de viață de pe Pământ, iar în capitolul de față vom explora unele dintre cele mai vechi dezvoltări evolutive. În spatele acestei diversități se află însă un fundament, un set „central" de gene care în principiu poate fi urmărit înapoi în timp până la LUCA.

Dovezile acestei obârşii provin din aplicarea tehnicilor pentru determinarea genomului diferitelor forme de viaţă. În anii 1970, microbiologul american Carl Woese a folosit tehnica de secvenţiere la ARN-ului ribozomal (ARNr). Un ribozom e format din 60% ARNr şi 40% proteine. ARN-ul ribozomal catalizează formarea legăturilor peptidice între structurile acceptoare ale moleculelor vecine de ARNt prezentate în capitolul precedent, cosând proteinele între ele ca o maşină de cusut.

Aceste secvenţe le-au permis lui Woese şi colegilor săi să determine „înrudirea" diferitelor forme de viaţă şi să identifice un fel de „cel mai mic numitor comun" al genelor pe care le posedă toate formele de viaţă. Nu e vorba pur şi simplu de a urmări moştenirea genetică înapoi în timp pe „verticală", de-a lungul generaţiilor până la un punct de origine. Organismele unicelulare pot transfera gene şi pe „orizontală", inserând gene străine în ADN-ul sau ARN-ul celulei.[166]

După cum am văzut în capitolul precedent, am putea în principiu să-l construim pe LUCA „de jos în sus" prin dezvoltarea unui metabolism primitiv, apariţia ARN-ului şi a codului genetic, sintetizarea proteinelor şi construirea membranelor celulare (nu neapărat în această ordine). Profilul genetic „de sus în jos", care rezultă prin secvenţierea ARNr-ului din organismele actuale, înfăţişează un protoorganism care se potriveşte în linii mari cu această sinteză „de jos în sus". Desigur, nu–i o coincidenţă, fiindcă orice scenariu al originii vieţii trebuie elaborat privind şi spre ceea ce vrem să obţinem. Îl numesc pe LUCA protoorganism deoarece dovezile nu sugerează că poate fi considerat un organism în toată puterea cuvântului, bine individualizat. În *Originea speciilor,* publicată pentru prima oară în 1859, Charles Darwin scria:[167]

Aşadar, ar trebui să deduc prin analogie că probabil toate fiinţele organice care au trăit vreodată pe acest Pământ au descins dintr-o formă primordială în care viaţa a fost pentru prima oară insuflată.

S-ar putea să nu fie chiar atât de simplu. Iată comentariul lui Woese din 1988, 139 de ani mai târziu:[168]

Strămoşul comun nu putea fi un organism anume, un singur şir de strămoşi. A fost un amestec eterogen slab întreţesut de celule primitive care au evoluat ca o unitate, iar în cele din urmă a ajuns într-un stadiu în care s-a separat în câteva comunităţi distincte care, la rândul lor, au devenit cele trei filiaţii principale.

Există argumente pentru ambele scenarii, dar nu încape îndoială că LUCA a dat naştere celor trei filiaţii fundamentale, despre care vom vorbi pe scurt.

Evoluția fotosintezei

De un lucru putem fi aproape siguri. Se pare că LUCA s-a născut într-un mediu practic lipsit de lumină şi de oxigen liber, ceea ce susţine ideea că viaţa a început în adâncul oceanului. Indiferent cum s-au format, aceste prime organisme au trebuit să găsească surse de hidrogen pentru a fixa carbonul din dioxidul de carbon şi – încă mai important – suficientă energie pentru a o face. Chiar dacă acceptăm ideea că LUCA s-a născut în mediul izvoarelor hidrotermale alcaline, de îndată ce şi-a părăsit locul de obârşie, n-a mai avut acces la sursa lui de hidrogen molecular.

Pesemne că organismele primitive care îşi puteau reconfigura echipamentul chimic pentru a captura atomi de hidrogen din alte surse disponibile (de pildă, hidrogenul sulfurat) au supravieţuit şi şi-au transmis genele relevante pentru această maşinărie generaţiilor viitoare. Organismele lipsite de un asemenea avantaj, neputând fixa carbonul şi metaboliza, au dispărut rapid.

Am spus „mediu practic lipsit de lumină", dar de fapt magma strecurată prin rifturile medio-oceanice din apropierea izvoarelor hidrotermale lucea palid. În prezent, această lumină pare să fie suficientă pentru o specie de bacterii sulfuroase verzi, care folosesc energia ei pentru a fixa carbonul din dioxidul de carbon, folosind hidrogenul sulfurat ca sursă de hidrogen.[169] Nu e greu de imaginat că, atunci când descendenţii primitivi ai lui LUCA pluteau pe fundul oceanului, cei dispunând de echipamentul chimic pentru *fotosinteză,* pentru folosirea energiei luminoase la metabolizare, aveau un avantaj evolutiv. Existenţa în prezent a unor asemenea bacterii oferă indicii importante despre primele forme de viaţă. Deşi echipamentele biochimice individuale simt

complexe (după cum vom vedea imediat), principiile generale sunt relativ simple.

Fotosinteza folosește energia luminoasă pentru a capta electroni de la un donor potrivit (cum e hidrogenul sulfurat, care își pierde hidrogenul), iar acești electroni declanșează un șir de reacții care produc fie ATP, fie un intermediar numit nicotinamid adenin dinucleotid fosfat (NADPH), cu ajutorul căruia e fixat carbonul și se alimentează un ciclu metabolic.

Lumina e captată de o structură proteică numită centru fotoactiv, o variantă a bine cunoscutului pigment *clorofilă.* Bacteriile sulfuroase verzi folosesc o formă de bacterioclorofilă, oarecum diferită de pigmentul plantelor verzi, care e sensibilă la radiația infraroșie cu lungimi de undă cuprinse între 700 și 750 de nanometri.

Mecanismul fotosintetic folosit de bacteriile sulfuroase verzi se numește Fotosistemul I. Alte forme de bacterii folosesc un al doilea mecanism, numit Fotosistemul II. Nu trebuie să reținem decât că centrul fotoactiv absoarbe lumina, captează electroni și fie stochează energia (Fotosistemul II), fie fixează carbonul (Fotosistemul I). Fotosistemele sunt strâns înrudite și probabil au evoluat dintr-un sistem ancestral comun. Din păcate, transferul orizontal de gene dintre procariote tinde să amestece genele diferitelor tipuri de organisme și face imposibilă urmărirea genealogiei.

Acest tip de fotosinteză se numește *anoxigenică*, ceea ce înseamnă că nu produce oxigen. Primele organisme fotosintetizante folosesc pesemne unul sau altul din cele două fotosisteme, dar sunt încă legate de medii care oferă surse de hidrogen și electroni, cum ar fi hidrogenul sulfurat. Pare ciudat, fiindcă ele au acces la un nou fond de lumină–energie și sunt înconjurate de apă care, desigur, conține atomi de hidrogen și poate acționa ca un donor de electroni. Din păcate, captarea hidrogenului și a electronilor din apă are un cost energetic prea mare. Ne aflăm într-un impas.

Evoluția însă nu cedează. Sistemele fotoactive utilizate la fotosinteza anoxigenică nu pot produce individual suficientă energie pentru a desprinde hidrogenul și electronii din apă, dar ce–ar fi să cuplăm

sistemele în serie? Biochimistul John Allen, de la Colegiul Queen Mary, Universitatea din Londra, a susţinut că organismele procariote primitive puteau să–şi fi dezvoltat ambele fotosisteme în paralel (în loc să le dezvolte individual în organisme separate), apelând când la unul, când la altul, în funcţie de mediul extern. Dacă ipoteza e corectă, atunci pare să fie un pas relativ mic folosirea celor două fotosisteme în serie. Lucrurile se schimbă din nou.

Funcţionarea mecanismului rezultant e ilustrată în figura 68. Două molecule de apă se leagă de o enzimă alcătuită dintr-un nucleu cu patru atomi de mangan şi o unitare de oxid de calciu înconjurată de proteine, care, după Russell, a fost probabil „împrumutată" de la fragmente utile de mineral, cum ar fi rancieitul ($CaMn_4O_9$). Din motive care se vor lămuri curând, acesta se numeşte „complexul generator de oxigen". El se află la capătul expus al unei structuri proteice mari conţinând şi clorofila, care absoarbe predominant lumina albastră şi cea roşie (reflectând verdele), cu un maximum al absorbţiei pe la 680 de nanometri.

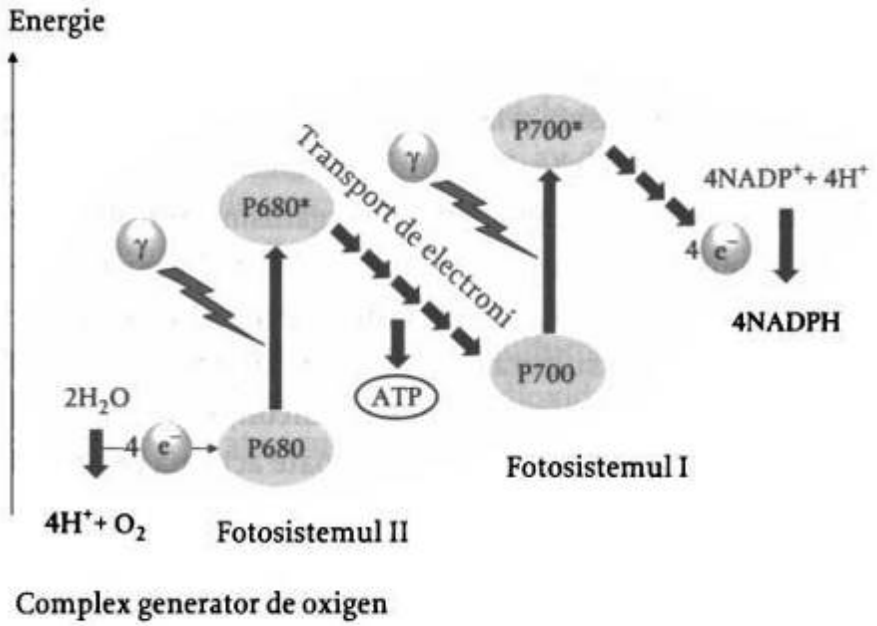


Figura 68. *„Schema Z" a fotosintezei care foloseşte lumină pentru a fixa carbonul din CO_2, apa (H_2O) fiind sursa de hidrogen. Oxigenul molecular (O_2) este eliberat ca produs secundar.*

Centrul fotoactiv din clorofilă absoarbe un foton de lumină, promovând un electron de pe un orbital molecular de energie joasă pe unul de energie înaltă. Nu are loc dezexcitarea, ci se declanșează o serie de reacții chimice pe care o putem privi ca pe un „transport" al electronului de-a lungul unui lanț, producând o moleculă de ATP prin chemiosmoză. Acesta e Fotosistemul II.

Electronul ajunge apoi în centrul activ al unui al doilea sistem de clorofilă, Fotosistemul I, cu un maximum de absorbție pe la 700 de nanometri. Între timp, „golul" încărcat pozitiv lăsat în urmă de electronul excitat din Fotosistemul II e umplut prin captarea unui electron de la o legătură O–H a unei molecule de apă din complexul generator de oxigen, un proton (H+) fiind eliberat în acest proces.

Clorofila din Fotosistemul I mai absoarbe alt foton, promovând un electron pe un orbital molecular de energie încă și mai înaltă. La rândul său, acest proces declanșează o altă cascadă de reacții implicând o proteină fier–sulf și împingând apoi electronul într-o formă de nicotinamid adenin dinucleotid fosfat cu sarcină pozitivă ($NADP^+$). Prin electronul adăugat, $NADP^+$ se transformă în varianta sa hidrogenată NADPH.

NADPH oferă acum sursa de hidrogen folosită la fixarea carbonului din dioxidul de carbon, cu ajutorul unei alte enzime și ceva ATP, într-un ciclu catalitic numit ciclul Calvin, după chimistul american Melvin Calvin. Atomul de carbon e inserat într-o moleculă de difosfat de ribuloză. Produsul rezultat e instabil și se descompune imediat, producând două molecule de fosfat de trioză (CHO–CH (OH)–$CH_2OPO_3^{2-}$), care pot forma apoi o moleculă de glucoză. Aceasta se numește „reacția întunecată", fiindcă nu implică absorbția luminii.

Să ne închipuim că parcurgem procesul de încă trei ori, adică de patru ori în total. În acest timp, Fotosistemul II atrage patru electroni din două molecule de apă în complexul generator de oxigen, eliberând patru protoni. Cei doi atomi de oxigen rămași se combină pentru a forma oxigen molecular, O_2, într-o reacție pe care o putem scrie global ca $2H_2O$ + fotoni –> O_2 + $4H^+$ + $4e^-$ (acum înțelegem de ce îl numim complexul generator de oxigen). La celălalt capăt al Fotosistemului I,

patru electroni (şi patru protoni) produc patru molecule de NADPH, într-o reacţie care se poate scrie ca $4NADP^+ + 4H^+ + 4e^- +$ fotoni –> 4NADPH.

E nevoie de două molecule de NADPH pentru a fixa un singur atom de carbon din dioxidul de carbon în reacţia întunecată, aşa că putem scrie o ecuaţie globală ca $2CO_2 + 2H_2O +$ fotoni –> „carbohidrat" + O_2. Am pus carbohidrat între ghilimele fiindcă produsul final al reacţiei întunecate este de fapt un precursor conţinând trei atomi de carbon, nu doi, deci ecuaţia nu e echilibrată, dar cred că aţi înţeles ideea.

Nu contează că hidrogenul folosit la fixarea carbonului nu este cel eliberat din moleculele de apă, doar rezultatul net contează. Aceasta e *fotosinteza oxigenică*, numită astfel din motive evidente. Obţinerea atomilor de hidrogen din apă în scopuri biologice reprezintă un moment unic în istoria evolutivă a vieţii pe Pământ, dar preţul ei e ridicat. Produsul secundar – oxigenul molecular – e foarte reactiv şi destul de toxic. El se infiltrează în oceane şi în atmosferă. A început terraformarea[170] Pământului.

Dovezi privind formele de viaţă primitive

Întrebat cât putea să fi durat până ce viaţa să apară pe Pământ, Stanley Miller spunea: „Un deceniu e prea puţin, la fel şi un secol. Dar zece sau o sută de mii de ani pare acceptabil, iar dacă nu poţi s–o faci într-un milion de ani, probabil că nu poţi s–o faci deloc."[171]

Care e aşadar natura dovezilor privind cele mai vechi forme de viaţă de pe Pământ? O asemenea căutare se bazează inevitabil pe straniile procese de fosilizare. Imediat ce moare, un organism e îngropat într-un precipitat de sediment, acumulat pe fundul râurilor şi oceanelor, care formează în timp straturi de roci. Spaţiile din organisme care sunt umplute cu lichid (cum ar fi citoplasma) vor fi acum umplute cu apă bogată în minerale. Mineralele precipită, producând o rocă pe care se întipăresc spaţiile din organism. Majoritatea materialului organic se descompune, lăsând o urmă a existenţei organismului în roca sedimentară. Este un eveniment aleatoriu, care nu se întâmplă prea des. În plus, scoarţa Pământul e reînnoită constant, vechea scoarţă (şi toate rocile sedimentare pe care le conţine) dispărând la frontierele

convergente ale plăcilor. Mare parte din scoarța continentală a Pământului este deci mult mai tânără decât Pământul.

Există totuși locuri unde putem găsi la suprafață rocă cu aproape un miliard de ani mai tânără decât Pământul. De pildă, Cratonul Kaapvaal din Africa de Sud și Cratonul Pilbara din vestul Australiei se crede că erau unite odinioară în primul supercontinent de pe Pământ, numit „Vaalbara" (prin alăturarea silabelor secunde din Kaapvaal și Pilbara), format pesemne acum circa 3,6 miliarde de ani și care a început să se fragmenteze în urmă cu vreo 2,8 miliarde de ani. Termenul „craton" arată că acestea sunt mase de rocă remarcabil de stabile, supraviețuind miliarde de ani.

În Cratonul Pilbara se află Grupul Warrawoona, o formațiune groasă de 12 km, alcătuită în mare parte din rocă vulcanică și rocă sedimentară cu granulație fină (numită *chert).* Analiza zirconiilor găsiți în rocile vulcanice de la baza acestei formațiuni le-a permis geologilor să determine că are o vârsta de 3471 milioane de ani. Zirconiile găsite în roca vulcanică din vârful formațiunii sunt ceva mai tinere, au 3458 milioane de ani.

Indicii privind structuri în chertul din Warrawoona au apărut pentru prima dată în 1980 și au fost identificate drept *stromatolite.* Acestea sunt formațiuni produse în roca sedimentară de comunități de celule bacteriene grupate în straturi subțiri sau „smocuri", cele mai cunoscute fiind cianobacteriile (numite uneori – greșit – „alge albastre–verzi"), bacterii fotosintetizante, prezente azi peste tot, unele dintre cele mai prospere microorganisme de pe Pământ. În 1986, paleontologii J. William (Bill) Schopf și Bonnie Packer, de la Universitatea Statului California din Los Angeles, au anunțat că au găsit dovezi privind existența unor bacterii fotosintetizante vechi de 3465 milioane de ani în chertul din Warrawoona. În 1993, Schopf a identificat 11 tipuri de organisme asemănătoare cianobacteriilor (vezi figura 68 pentru câteva exemple).

În 2002, paleontologul Martin Brasier de la Oxford a contestat descoperirile lui Schopf, susținând că structurile observate în chertul din Warrawoona au

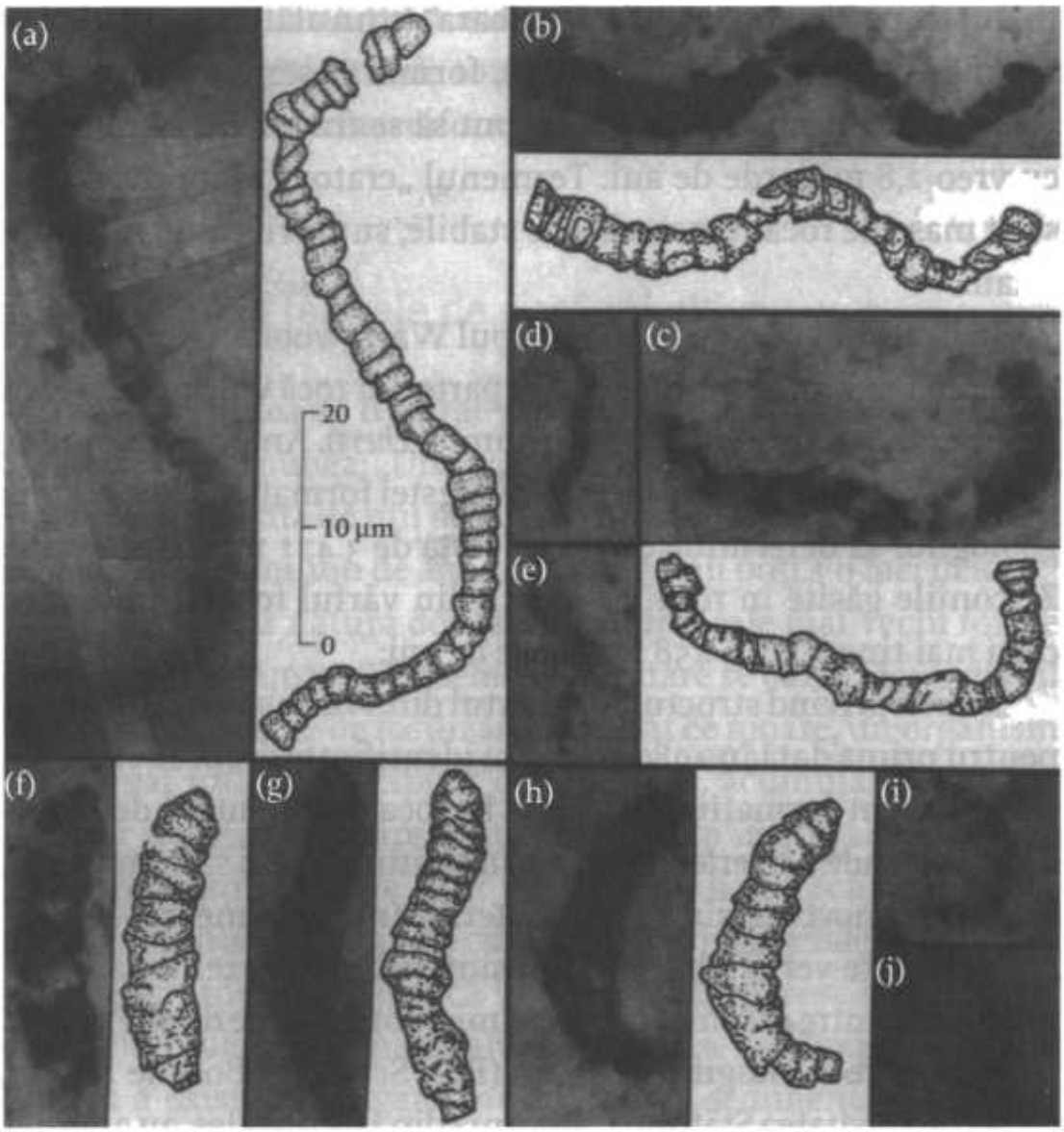


Figura 69. *Schopf a afirmat că aceste structuri găsite în chertul din Warrawoona sunt exemple de microfosile, rămășițele fosilizate ale unora dintre cele mai vechi organisme microscopice. În desenul din dreapta imaginii (a) se află o scară, unde µm înseamnă micrometri, 10^{-6} metri. Schopf numea aceste structuri „asemănătoare cianobacteriilor", dar ulterior a acceptat că nu existau suficiente dovezi în favoarea afirmației sale. Nu pare să se fi ajuns la un consens că e vorba de microfosile autentice (unele unghiuri din desen par mai curând caracteristice creșterii cristalelor), dar avem alte dovezi solide privind existența organismelor la începutul Arhaicului. Reprodus cu permisiunea lui J. William Schopf din* Science. *260 (1993), p. 643.*

fost greșit interpretate și că erau rezultatul unor procese pur geologice, nu bio–geologice. Brasier i-a acuzat pe Schopf și colegii săi că au văzut

ce voiau să vadă, susţinând într-un articol ulterior că: „În loc să ne întrebăm «Ce sunt aceste structuri?», am avut pornirea de a ne întreba «De ce anume ne amintesc aceste structuri?»”[172] Schopf a ripostat cu dovezi privind resturi de material organic caracteristic organismelor fotosintetizante găsite la marginile acestor structuri, sugerând că ar fi rămăşiţele descompuse ale organismelor care le-au creat. Pentru Brasier însă, carbonul era din surse anorganice. Disputa a fost aprigă.

Într-un articol din 2006 Schopf rezuma dovezile provenind din 48 de exemple de structuri din eonul Arhaic din Australia, America de Sud, Canada, India şi Zimbabwe, cu vârste între 3496 şi 2548 milioane de ani. El acceptase că nu puteau fi fosile ale unor vechi cianobacterii fotosintetizante, dar încheia spunând: „Aceste date susţin opinia majorităţii paleontologilor că viaţa există de cel puţin 3500 de milioane de ani”.[173] Un studiu din 2009 al stromatoliţilor din Formaţiunea Strelley Pool (parte a Grupului Warrawoona), efectuat de o echipă de paleontologi americani şi australieni, respingea posibilitatea microfosilelor, dar conchidea: „[...] dovezile păstrate în Strelley Pool sugerează că probabil au existat comunităţi microbiene cu 3,43 miliarde de ani în urmă în Marea Pilbara, prosperând în condiţii de mediu schimbătoare.”[174] Doi ani mai târziu, o analiză detaliată a microstructurilor din Strelley Pool, avându–i coautor pe Brasier, ajungea la concluzia că acestea sunt microfosilele unor organisme bazate pe sulf.[175] Structuri sedimentare similare de origine microbiană, cu vârsta de 3,48 miliarde de ani, au fost descoperite în Formaţiunea Dresser, tot din Cratonul Pilbara.[176]

Aceste rezultate arată că forme de viaţă relativ complexe, asemănătoare cianobacteriilor şi bacteriilor sulfuroase, prosperau deja la doar câteva sute de milioane de ani după Ultimul Mare Bombardament. Dar ca viaţa să prospere, nu trebuie oare să fi apărut şi mai devreme? Un articol din 1996 despre rapoartele dintre izotopii carbonului din incluziunile carbonatice în granulele de apatit (fosfat de calciu) din vestul Groenlandei conchidea că acestea indică o activitate biologică veche de 3,8 miliarde de ani.[177] Studii mai recente (2014) ale rapoartelor dintre izotopii de carbon din grafitul aflat în roci vechi de 3,7 miliarde de ani ajungeau la aceeaşi concluzie.[178]

E posibil ca viața să preceadă Ultimul Mare Bombardament, și deci să-i fi supraviețuit? Rezultatele unor simulări pe calculator publicate în 2009 oferă indicii solide în acest sens. Simulările arată că, deși bombardamentul a fost devastator, unele părți din scoarța Pământului ar fi rămas locuibile, iar orice formă de viață care va fi apărut putea supraviețui.[179] Paleontologii au învățat să fie precauți. Obținerea unei dovezi tranșante din cele mai vechi structuri de roci accesibile de pe Pământ s-a dovedit extrem de dificilă. Există însă acum un consens destul de robust că viața bacteriană era solid ancorată pe Pământ cu cel puțin 3,5 miliarde de ani în urmă.

Domeniile Bacteria și Archaea

Pentru început, trebuie să lămurim termenul „bacterie". Până în 1977 biologii credeau că există un singur „regn" al organismelor procariote unicelulare simple – cel al bacteriilor. Însă când Carl Woese a început să cerceteze ascendența organismelor vii prin secvențierea ARN-ului ribozomal, a descoperit că există două regnuri, nu unul. În 1990, Woese și colegii săi au propus ca acestea să fie numite „domenii". Termenul „regn" e acum rezervat următorului nivel din taxonomia biologică.

Pe lângă domeniul Bacteria, mai există și domeniul „Archaeabacteria" sau doar „Archaea". Aceste forme de viață sunt foarte asemănătoare bacteriilor în privința dimensiunii și formei, dar au alte seturi de gene, cicluri metabolice și membrane celulare. Inițial se credea că acestea trăiesc doar în medii extreme, cum ar fi izvoarele termale și hidrotermale, însă acum știm că sunt mai larg răspândite. Metanogenele din intestinele noastre (unde ajută digestia, producând metan) sunt arhee, nu bacterii.

Nu e limpede când și cum s-au despărțit aceste două forme. S-ar putea ca ele să fi evoluat separat din LUCA, „ramificându-se" în direcții genetice diferite. Unii biologi susțin că e improbabil și că una trebuie să fi evoluat din cealaltă. Indiferent cum au stat lucrurile, putem fi siguri că aceste forme de viață diferite au evoluat pe Pământ de-a lungul unui miliard de ani, între 3,5 și 2,5 miliarde de ani în urmă (figura 70).[180]

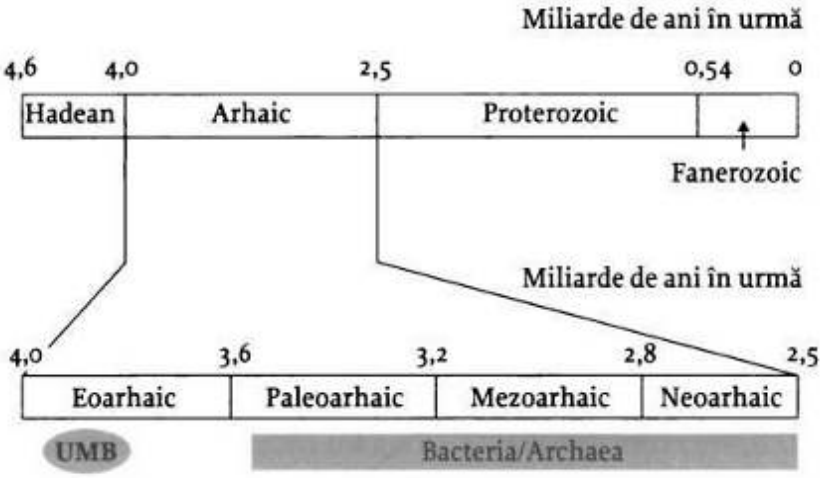


Figura 70. *Scara timpului geologic al Pământului este împărțită în patru eoni - Hadean, Arhaic, Proterozoic și Fanerozoic. Eonul Arhaic se întinde între 4,0 și 2,5 miliarde de ani în urmă și e împărțit, la rândul lui, în patru „ere": Eoarhaic, Paleoarhaic, Mezoarhaic și Neoarhaic. Ultimul Mare Bombardament (UMB) a avut loc în era Eoarhaică, acum circa 3,8 miliarde de ani. Dovezile structurilor sedimentare induse de microorganisme sugerează că bacteriile și arheele prosperau deja la începutul erei Paleoarhaice.*

În cadrul fiecărui domeniu, selecția naturală a condus la evoluția unei mari diversități de *încrengături.* Fiecare încrengătură e genetic distinctă și identificabilă, dar prezintă caracteristici comune domeniului. În 1990, Woese și colegii săi au așezat un set de bacterii și arhee pe un „arbore" filogenetic al vieții, în care ordinea ramificărilor și lungimea fiecărei ramuri derivă din gradul de „înrudire" a încrengăturilor pe baza secvențierii ARN-ului ribozomal (figura 71). Puțini oameni de știință de azi cred că secvențierea genelor în subunități atât de mici reflectă exact natura „adevărată" a relațiilor genetice dintre încrengături, iar versiuni mai recente ale acestui arbore includ mai multe încrengături și diferite structuri ramificate, însă principiul fundamental rămâne neschimbat.

Ideea de arbore al evoluției e sugestivă, însă poate fi înșelătoare, mai ales la procariote. Avem tendința să ne închipuim că evoluția acționează prin moștenire genetică, genele trecând vertical de la părinte la progenitură, dar procariotele pot transmite gene pe orizontală, iar genele pot fi transferate între bacterii și arhee. Un arbore bazat pe genele din ARNr nu e neapărat reprodus în alte secvențe de gene. Ca atare, unii biologi moleculari preferă să ilustreze evoluția procariotelor printr-un „cerc" sau „inel" al vieții.

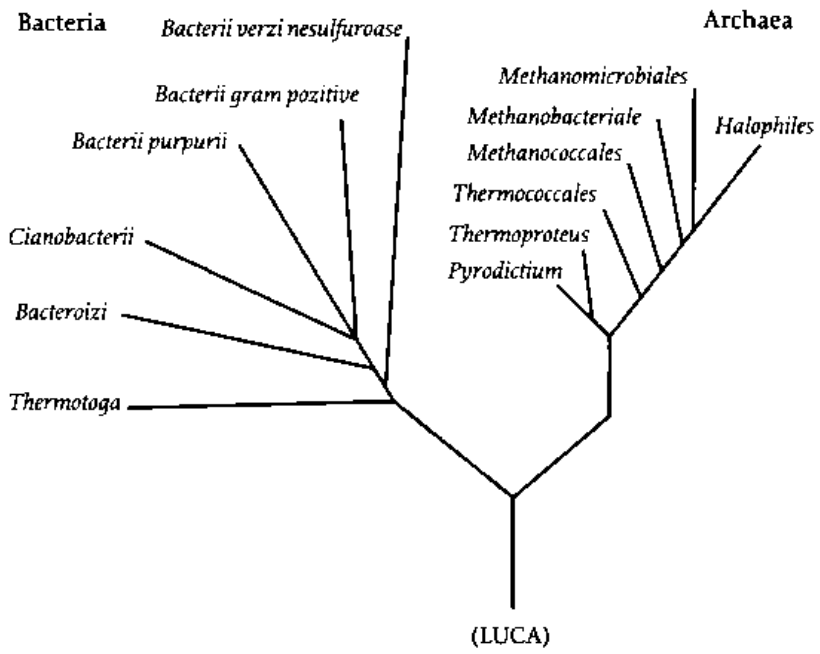


Figura 71. *Primul „arbore" filogenetic al vieții a fost publicat de Carl Woese și colegii săi în 1990. Ordinea ramificărilor și lungimea ramurilor reflectă gradul de „înrudire" a diferitelor forme de viață pe baza comparațiilor între secvențele de ARNr. Doar două domenii sunt prezentate aici (vezi capitolul 10 pentru imaginea completă). Adaptat după Carl R. Woese, Otto Kandler și Mark R. Wheelis,* **Proceedings of the National Academy of Sciences,** *87 (1990), p. 4578.*

Știm prea bine că evoluția pe Pământ a produs și altceva decât bacterii și arhee, însă e o greșeală să credem că evoluția împinge inevitabil viața către o complexitate tot mai mare. Bacteriile și arheele sunt forme de viață de mare succes și au rămas relativ neschimbate, în termeni evolutivi, timp de vreo trei miliarde și jumătate de ani. Dacă ar fi descoperim viață extraterestră, eu aș paria pe o formă de procariote. Ca să ne vindecăm de grandomanie, să reținem că în corpul nostru există de zece ori mai multe celule bacteriene decât celule umane...

Marea oxidare

După cum am văzut, spre sfârșitul Arhaicului bacteriile și arheele prosperă. Deși cianobacteriile s-ar putea să nu fi avut în urmă cu 3,5 miliarde de ani forma lor actuală, există dovezi care arată că erau prezente aici în urmă cu 2,7 miliarde de ani. Ne putem închipui suprafețele oceanelor populate cu uriașe aglomerări de cianobacterii care, împreună cu alte tipuri de organisme fotosintetizante, eliberau treptat oxigen în atmosferă și în oceane vreme de sute de milioane de

ani. Dovezile ştiinţifice pentru ceea ce se întâmplă în continuare sunt de neclintit în unele locuri, şi mai puţin solide, dar nu mai puţin convingătoare, în altele. Iată ce credem că ştim.

După cum am spus, oxigenul molecular e foarte reactiv. Când ajunge în atmosferă şi oceane, începe să oxideze toate substanţele întâlnite. Oceanele conţin fier dizolvat produs de activitatea vulcanică, care acum e oxidat, devenind oxid de fier (rugină). Rugina precipită, formând straturi de rocă sedimentară roşie, numite *formaţiuni defier în benzi,* care astăzi sunt principala sursă de fier.[181]

Desigur, oxigenul e un produs rezidual al fixării carbonului prin fotosinteza oxigenică, iar substanţele organice sunt de asemenea predispuse oxidării (pentru a produce dioxid de carbon şi apă). Nu e greu de închipuit că în această situaţie, oxigenul poate fi circulat înainte şi înapoi, produs prin fotosinteză şi consumat de fierul dizolvat şi de materia organică moartă. Însă când supercontinentul Vaalbara începe să se fragmenteze, o importantă cantitate de materie organică e îngropată în mările mai puţin adânci formate de noile şelfuri continentale, eliminând o cantitate mare de oxigen şi dezechilibrând ciclul acestuia. Oxigenul începe să se acumuleze în zonele de mică adâncime ale oceanelor, unde pătrunde lumina Soarelui.

Oxigenul eliberat în atmosferă reacţionează imediat cu hidrogenul molecular şi cu metanul. Acesta din urmă e produs de activitatea vulcanică şi de bacteriile metanogene, dar metanogenele sunt organisme anaerobe care luptă pentru supravieţuire într-un mediu bogat în oxigen. Când ele dispar, e produs mai puţin metan, iar atmosfera se saturează cu oxigen. Am depăşit un moment de răscruce şi nu mai există cale de întoarcere.

Sub acţiunea luminii ultraviolete a Soarelui, oxigenul molecular din stratosferă se descompune în atomi de oxigen liberi, care reacţionează cu oxigenul molecular, formând ozon (O_3). Ozonul absoarbe mai multă lumină ultravioletă şi se descompune, la rândul lui, în oxigen molecular şi atomi de oxigen liberi. Atomii de oxigen pendulează între oxigen molecular şi ozon, absorbind continuu radiaţie. Începe să se formeze un strat de ozon care protejează suprafaţa Pământului de lumina ultravioletă.

Oxizii de sulf din atmosferă (cum ar fi SO_2) produşi de activitatea vulcanică sunt acum şi ei protejaţi de lumina ultravioletă. Sulful are patru izotopi principali, iar diverse procese geochimice produc variaţii în distribuţia acestor izotopi care depind de masele lor relative. Dar fotoliza prin lumină ultravioletă provoacă variaţii care *nu* depind de masele izotopilor. Aceasta se numeşte *fracţionare independentă de masă (mass–independent fractionation*, MIF). MIF-ul unui izotop de sulf, de pildă ^{33}S, este prin urmare un indiciu al fotolizei oxizilor de sulf prin lumina ultravioletă. Oxizii de sulf se depun pe Pământ şi reacţionează cu fierul din oceane, precipitând şi formând o rocă sedimentară numită pirită (FeS_2). Astfel că orice urmă de MIF a sulfului atmosferic se traduce printr-un MIF echivalent al piritei.

Studii ale formaţiunilor de fier în benzi arată că s-au format periodic pe tot parcursul Arhaicului, oprindu-se brusc cu 2,4 miliarde de ani în urmă, la începutul Proterozoicului (figura 72(a)), ceea ce coincide cu o tranziţie şi mai grăitoare în MIF-ul izotopului 33S din pirită (figura 72(b)), care scade la zero. Se pare că în urmă cu 2,4 miliarde de ani, fotoliza oxizilor de sulf din atmosferă încetează. Cea mai logică explicaţie este că nivelul oxigenului atmosferic a crescut suficient pentru a oferi un strat protector de ozon. Avem mai multe dovezi în acest sens, iar în privinţa scenariului general, numit Marea Oxidare, nu încap îndoieli. E greu de spus cât de mult oxigen a fost produs. Astăzi, oxigenul molecular reprezintă circa 21% din volumul atmosferei. Cele mai bune estimări arată că în atmosfera de la începutul Proterozoicului nivelul oxigenului era de doar 5–18% din cel de azi. Nu e mult, însă e suficient ca să schimbe lumea.[182]

În prezent suntem pe drept cuvânt îngrijoraţi că arderea combustibililor fosili influenţează clima Pământului, provocând creşterea temperaturii medii la

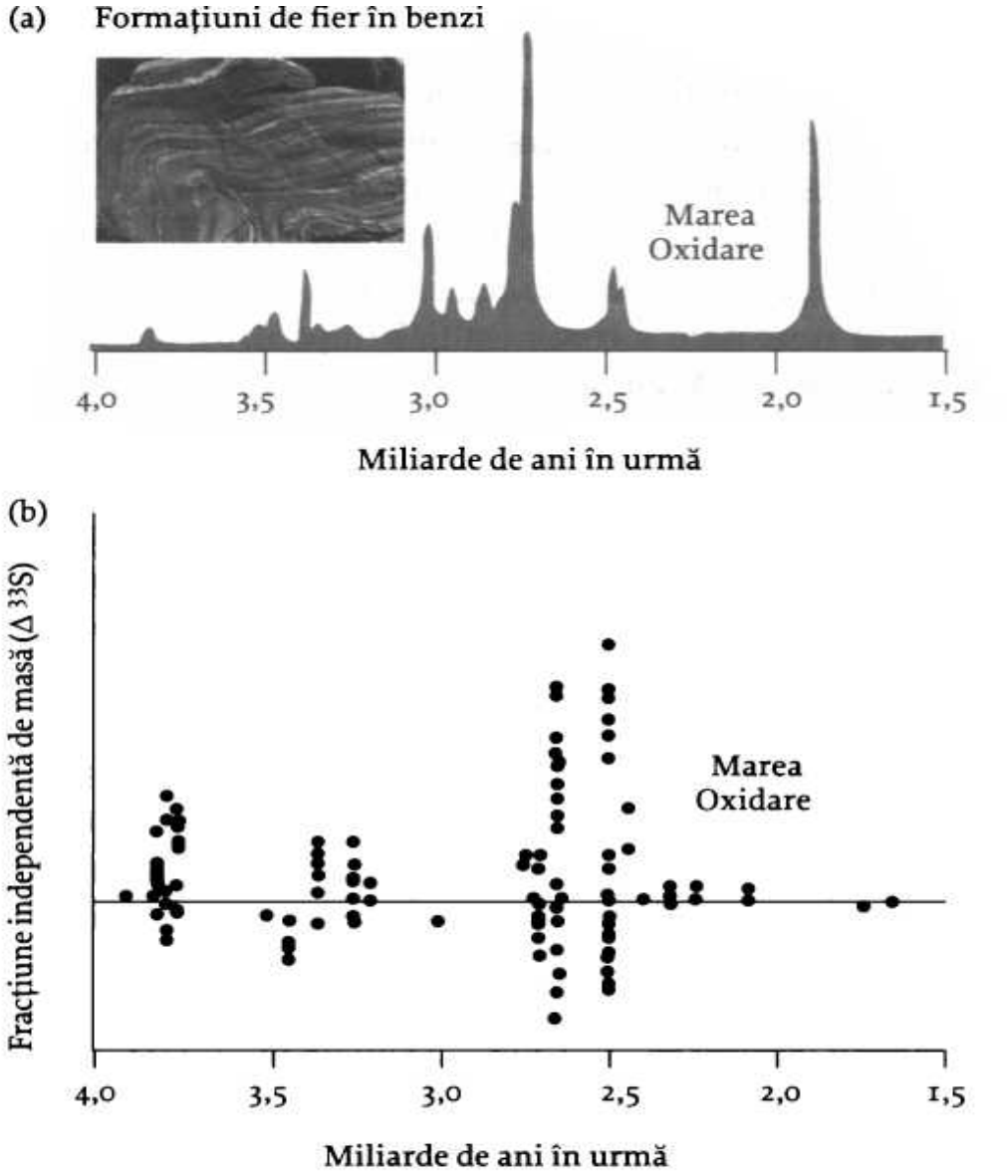


Figura 72. *(a) Formațiunile de fier în benzi sunt produse de oxidul de fier (rugină), format în reacția dintre fierul dizolvat și oxigenul molecular. Studiul acestor formațiuni arată că s-au depus regulat la începuturile Pământului, dar fenomenul a încetat brusc în urmă cu circa 2,4 miliarde de ani. Se crede că aceasta se datorează oxigenării accelerate a atmosferei și oceanelor în cursul Marii Oxidări. S-au propus mai multe explicații pentru depunerile de acum 1,8 miliarde de ani, dar principala cauză pare să fi fost mișcările tectonice. Fracțiunea independentă de masă (MIF) a ^{33}S variază în timp, până când, în urmă cu 2,4 miliarde de ani, scade brusc la zero (b). Se crede că aceasta e un indiciu al formării unui strat protector de ozon în stratosferă, protejând Pământul de lumina ultravioletă a Soarelui.*

suprafață lui și fenomene meteorologice imprevizibile. Arderea (de fapt, oxidarea) combustibililor fosili face ca materialul organic îngropat

odinioară în rocile sedimentare să se întoarcă la sursă – dioxidul de carbon, un „gaz cu efect de seră” care stochează căldură și crește temperatura de la suprafața planetei. E greu de imaginat că formele de viață pot avea un asemenea impact global, dar există un precedent. La începutul Proterozoicului, oxigenul eliberat de bacteriile și arheele fotosintetizante a schimbat clima Pământului. El a îndepărtat metanul din atmosferă – or, metanul e gaz cu un efect de seră și mai puternic. Pământul își pierde una dintre păturile izolatoare. Căldura nu mai e păstrată, iar suprafața se răcește.

La aceasta contribuie și alți factori. Ploaia scoate dioxidul de carbon din atmosferă sub formă de acid carbonic, care cade peste mineralele de silicat scoase la suprafață de îndepărtarea continentelor, dizolvându-le și transportând ionii de calciu și bicarbonat în mare, de unde nu se vor mai întoarce. Pământul începe să–și piardă o altă pătură izolatoare. Deplasarea continentelor îngroapă carbonul organic, destabilizând și mai mult sistemul și eliberând și mai mult oxigen în atmosferă.

Pământul e prins într-un cerc vicios. Nu este prima „eră glaciară” prin care trece, dar e de departe cea mai gravă. Climatologul rus Mihail Budîko afirma că, odată ce gheţarii ajung până la 30° latitudine, e depășit un prag. Gheața reflectă lumina Soarelui, inclusiv căldura lui, răcind și mai mult planeta (efectul de albedo al gheții), iar gheţarii continuă să se apropie de ecuator. Aceasta e glaciaţiunea Huroniană–Makganiană, care va dura 300 de milioane de ani. Pământul devine un „bulgăre de zăpadă”.

Endosimbioza și apariția eucariotelor

Marea Oxidare e o sabie cu două tăișuri. Înseamnă sfârșitul unor forme de organisme anaerobe, fie pentru că nu suportă oxigenul, fie pentru că nu mai au acces la nutrienți esențiali (sulfurile, de pildă) care sunt „înhățați” de oxigen. Există însă și celălalt tăiș. De fiecare dată când pornim mașina, apreciem valoarea materiei organice moarte ca sursă de energie.[183] Proliferarea bacteriilor și arheelor de la începutul Proterozoicului produce inevitabil o cantitate mare de materie organică moartă. Avem dovezi care sugerează că bacterii capabile să „ardă” această materie, folosind oxigen, pentru a obține o sursă de energie (ATP) au apărut cu mult înainte de Marea Oxidare, bazându-se probabil

pe surse anorganice de oxigen. Dacă așa stau lucrurile, pentru aceste bacterii Marea Oxidare a fost un eveniment fericit.

Asemenea organisme nu fixează carbonul, ci apelează la surse de „carbon organic dizolvat", fixat anterior de alte organisme.[184] *Pelagibacter ubique*, o α–proteobacterie (o formă minusculă de bacterie purpurie, figura 71), este poate cea mai răspândită bacterie de pe Pământ și reprezintă o parte importantă din întregul plancton marin. Ea se hrănește cu carbon organic dizolvat și folosește oxigenul pentru a converti carbonul în dioxid de carbon, apă și ATP. Aceasta se numește *respirație celulară.* Deși celulele nu „respiră" în sens fiziologic, ele „inhalează" oxigen prin pereții lor și „expiră dioxid de carbon".[185]

Trebuie să fim atenți la ce se întâmplă în continuare, fiindcă se deschide o cale evolutivă care va conduce în cele din urmă la noi. Să ne imaginăm o comunitate mixtă de bacterii și arhee care își duc viața în strânsă vecinătate. Când nivelul de oxigen crește, selecția naturală favorizează organismele de tipul α–proteobacteriilor. Să presupunem acum că rezervele lor de carbon organic dizolvat sunt pe cale de epuizare. Între timp, arheele anaerobe se luptă pentru supraviețuire. Lipsite de sursa de nutrienți esențiali, nu mai pot produce ATP și sunt condamnate la moarte prin înfometare. E un moment decisiv. Arheele au nevoie de ATP, iar α–proteobacteriile au nevoie de carbon organic pentru a produce ATP. Nu e limpede cum a început relația dintre ele, dar ea s-a dezvoltat într-o versiune biologică sofisticată a principiului „te scarpin pe spate dacă mă scarpini și tu pe mine". Organismele devin puternic codependente – nu pot supraviețui unele fără altele. Mai devreme sau mai târziu, micile α–proteobacterii sunt absorbite în mai marile arheobacterii, iar dimensiunea celulei crește. Rezultatul e *endosimbioza,* bacteria endosimbiontă trăind în gazda arhee.

Bacteria nu e digerată, dar nu supraviețuiește în forma ei inițială. Ea rămâne înconjurată de propria–i membrană, însă păstrarea unui set dublu de gene și ribozomi în celula mai mare e ineficientă. Unele gene bacteriene sunt inserate în genomul arheei, iar altele rămân într-un mic cromozom circular. Vechea bacterie păstrează un set de ribozomi necesari pentru producerea unui ansamblu limitat de proteine. Suntem pe cale să obținem o *celulă complexă*.

Bacteriile absorbite devin *mitocondrii,* „organite" (subunități) ale celulei complexe care funcţionează ca niște „centrale energetice". Ele oxidează compușii organici din citoplasma celulei, cum e glucoza, producând dioxid de carbon și apă, și transferând energie sub formă de ATP. Păstrându–și un cromozom și dispozitivul chimic necesar fabricării de proteine, mitocondria are o anumită autonomie operațională locală, pentru a se asigura că energia e livrată celulei gazdă mai mari exact atunci când e nevoie.

Această remarcabilă strategie evolutivă se regăsește la arhee și cianobacteriile fotosintetizante. În loc să formeze mitocondrii în celula mai mare, cianobacteriile endosimbionte (împreună cu sistemele lor fotoactive pentru conversia luminii în ATP și fixarea carbonului) produc un alt tip de organite, numite *cloroplaste*.

Desigur însă, nimic nu se obţine pe gratis. Succesul evolutiv al bacteriilor și arheelor a depins parţial până acum de transferul orizontal de gene, de capacitatea acestor organisme de a amesteca puțin lucrurile și, prin mutații aleatorii și „încercări și eșecuri", de a descoperi secvențe de gene avantajoase în selecţie. Există câteva mecanisme, dar unele gene sunt foarte mobile, formând „elemente transpozabile" (sau *transpozoni*) al căror comportament e ilustrat printr-un nume mai prozaic – *gene săltărețe (jumping genes)*, descoperite în 1944 de geneticiana americană Barbara McClintock.

Genele săltărețe sunt extrem de „egoiste" și se comportă ca un virus. O genă săltăreață instalată într-o catenă de ADN nu e transcrisă în AM. În cursul transcrierii, ea se pliază și se excizează din secvență. Gena ejectată oferă o matriță pentru o replicare rapidă (am putea spune chiar agresivă). Genele duplicate se inserează înapoi în ADN, în general în locuri aleatorii. Orice încercare de a transcrie o genă săltăreaţă face ca gena să se răspândească în ADN-ul gazdă.

Lucrurile încep să se complice, însă totul e bine atâta timp cât genele săltărețe nu pot fi transcrise și folosite pentru a fabrica proteine. Problema este că, atunci când aceste gene devin latente, ele nu mai ies din secvență, și ca atare sunt transcrise în AM. Asemenea gene săltărețe latente se numesc *introni.* Pentru că intronii se instalează la întâmplare în genom, ei nu codifică o proteină funcţională, dar pot activa sau

dezactiva alte gene. Rezultatul final e haosul: ribozomii fabrică o mulțime de proteine inutile.

Pe o cale încă necunoscută, la α–proteobacterii s-a dezvoltat un mecanism care rezolvă problema. Aceste organisme reușesc să elimine aproape toate genele săltărețe. Deși cele rămase sunt puține, arheea gazdă nu dispune de un mecanism care să le facă față. Când genomul ei acumulează multe gene de la endosimbionți, ea e „infectată" cu gene săltărețe și introni. Prețul plătit e în cel mai fericit caz o „indigestie". Mare parte din aceste celule complexe începătoare au fost pesemne distruse de „catastrofa intronilor". Cele care au supraviețuit și-au dezvoltat o strategie de a face față intronilor, îndepărtându–i înainte de transcriere. Ele au realizat acest lucru învelind în proteine centrii activi ai celulelor săltărețe (fiecare constând în aproximativ 150 de nucleotide), pentru a produce *spliceosomi.*

Apare însă o problemă. Într-o celulă procariotă, ADN-ul din nucleoid și ribozomii – combinatele chimice unde sunt fabricate proteinele – se află în strânsă vecinătate. Transcrierea unei secvențe de genă din ADN în ARNm, iar apoi transportul acestuia la ribozomi pentru a construi proteine ia foarte puțin timp. În celulele actuale, proteinele sunt asamblate într-un ritm de aproximativ un aminoacid pe secundă. Spliceosomii funcționează însă mai lent, luându-le între 10 și 200 de secunde pentru a îndepărta un intron. Dacă intronii nu pot fi eliminați suficient de repede, mulți dintre ei vor fi transcriși și se vor fabrica proteine inutile. În 2006, botanistul american William Martin și biologul american de origine rusă Eugène Koonin au propus o soluție: genomul celulei trebuia separat de ribozomi ascunzându-l într-un *nucleu celular.*

Nucleul e centrul de comandă și control al celulei. E format dintr-o membrană externă dublă în care se află pori formați din complexe proteice prin care moleculele mari pot intra și ieși folosind proteine transportoare. El adăpostește ADN-ul, care, datorită achiziției unor noi gene de la endosimbionți (și acumulării de gene săltărețe și introni), formează o serie de structuri liniare încorporate într-o matrice proteică.[186] Conține de asemenea *nucleolul,* unde sunt asamblați ribozomii.

Spliceosomul poate acționa acum ca un „precursor” al ARN-ului mesager în nucleu, având la dispoziție oricât de mult timp pentru a elimina toți intronii, iar apoi ARN-ul mesager „matur” e transportat prin pori la ribozomi. Ordinea e restabilită, însă doar prin tratarea simptomelor, nu și a cauzei. ADN-ul gazdă rămâne infestat cu introni, iar aceştia sunt transmişi generaţiilor succesive.

Evoluţia nucleului celulei anunţă apariţia *celulelor eucariote.* Numele provine din greacă și se traduce prin „nucleu adevărat”. Acum înțelegem că denumirea de *procariotă* arată că celulele nu posedă un nucleu adevărat. Cu alte cuvinte, celulele procariote și-au căpătat numele pentru ceea ce nu sunt (vezi comparația din figura 73).

Teoria originii celulelor eucariote prin endosimbioză are o istorie lungă. A fost propusă pentru prima dată în 1905 de botanistul rus Konstantin Merejkovski de la Universitatea din Kazan, și redescoperită independent în 1967 de Lynn Margulis (soția cosmologului american Carl Sagan). Era o idee radicală, iar articolul ei a fost respins de 15 ori, pentru a fi în cele din urmă publicat în *Journal of Theoretical Biology*.

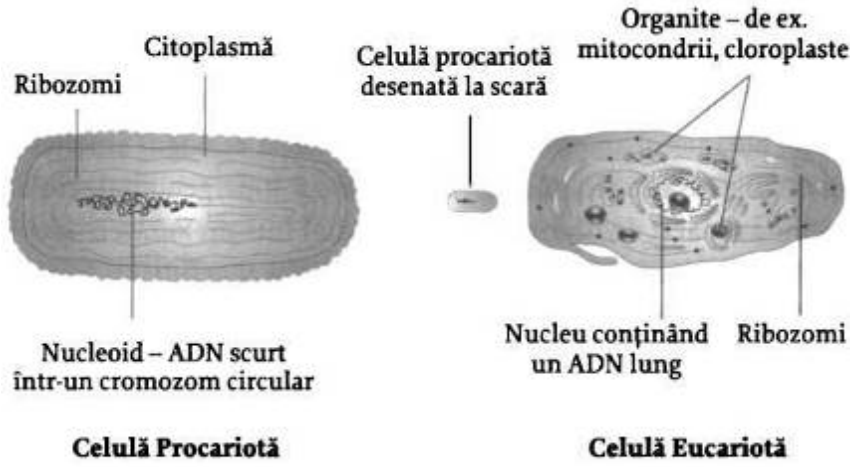


Figura 73. *Comparație între o celulă procariotă și una eucariotă. Procariotele au de regulă lungimi între 0,2 și 1,0 microni și posedă o structură simplă formată dintr-un ADN scurt, alcătuit dintr-un cromozom circular, ribozomi și o citoplasmă conținând circa 80% apă. Eucariotele sunt mult mai mari, între 1 și 10 microni în lungime, cu o structură internă mult mai complexă, formată dintr-un nucleu, organite (cum sunt mitocondriile și cloroplastele), ribozomi, citoplasmă și altele.*

Deși nu e singurul candidat pentru explicarea originii celulelor eucariote, endosimbioza pe care am prezentat–o aici e larg acceptată. Dovada că mitocondriile, centralele energetice ale eucariotelor, au un

strămoș comun cu α–proteobacteriile pare convingătoare.[187] De asemenea, e în genere acceptat faptul că organismul gazdă trebuie să fi fost o arhee, iar analiza genetică ne oferă unele dovezi despre identitatea acesteia.[188] Deși mai puțin sigură, ipoteza Martin–Koonin privind originea nucleului pare totuși destul de convingătoare. În 2009, biochimistul britanic Nick Lane spunea: „Aceasta e genul de idee care dă magie științei, și sper că e corectă."[189]

Mărimea contează

Dar când a avut loc simbioza? Dovezile fosile privind prezența eucariotelor unicelulare sunt, în cel mai fericit caz, vagi. Poate părea surprinzător, în fond eucariotele sunt mult mai mari decât procariotele, și cu toate că multe detalii ale structurii se pierd în procesul de fosilizare, dimensiunea lor ar trebui să fie un indiciu bun. Din păcate, nu e chiar atât de simplu. Deși nu există bacterii mai mari decât cele mai mari eucariote și nici eucariote mai mici decât cele mai mici procariote, gamele lor de dimensiuni se suprapun.

Un articol din 1999 prezenta dovezi privind existența unor eucariote vechi de 2,7 miliarde de ani în Cratonul Pilbara, pe baza observării așa–numiților biomarkeri sau „fosile moleculare", urme ale unor substanțe asociate cu biologia eucariotelor. Interpretarea dovezilor e îndoielnică din cauza posibilității contaminării eșantioanelor, dar cercetări ulterioare par să vină în sprijinul descoperirii inițiale. Într-un studiu recent se spune că dovezile sunt tentante, însă „trebuie să le privim cu precauție și să așteptăm verificări ulterioare".[190]

Dovezile existenței formelor de viață eucariotă în urmă cu 1,8–2 miliarde de ani sunt mai puțin controversate și confirmă ipoteza că endosimbioza ar fi fost declanșată (sau cel puțin accelerată) de Marea Oxidare.[191] De fapt, nu contează prea mult. Știm că în câteva sute de milioane de ani, la sfârșitul glaciațiunii Huroniană–Makganiană, eucariotele evoluaseră spectaculos. Cele mai vechi fosile eucariote sunt cele ale unei alge fotosintetizante spiralate – *Grypania spiralis* – găsite în Formațiunea Negaunee, o formațiune de fier în benzi din Peninsula Michigan. Vârsta lor a fost inițial estimată la 2,1 miliarde de ani, iar după unele corecții, la 1,9 miliarde de ani.

Aveți în vedere următorul lucru. *Thiomargarita namibiensis*, o bacterie sulfuroasă găsită în sedimentele oceanice din șelful continental al Namibiei, e una dintre cele mai mari bacterii descoperite vreodată. Ea ajunge la dimensiuni de 0, 75 milimetri, suficient pentru a fi văzută cu ochiul liber. Pe de altă parte, fosila *Grypania spiralis* are o lungime de câțiva centimetri și o grosime de 0,5–0,6 milimetri (figura 74). Volumul lui *Grypania spiralis* e de aproximativ un milion de ori mai mare decât volumul mediu al organismelor procariote.

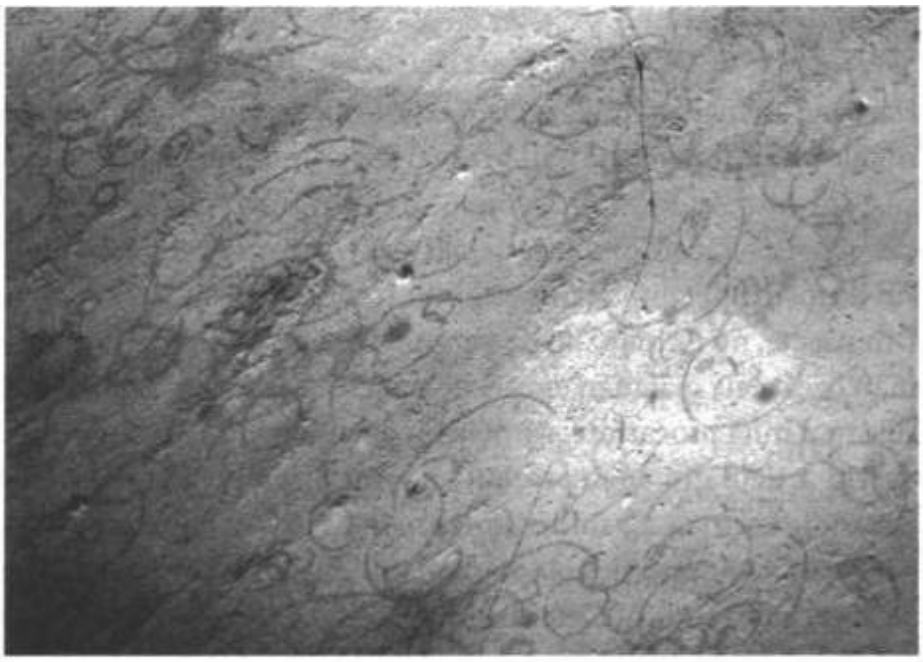


Figura 74. *Dovezi fosile privind* **Grypania spiralis**, *o algă pluricelulară veche de 1,9 miliarde de ani, din Formațiunea Negaunee. Aceste fosile în formă de panglică au o grosime de câțiva milimetri și o lungime de până la 10 centimetri.*

Mărimea (și organizarea celulară, desigur) contează. Bacteriile și arheele sunt constrânse în privința mărimii și complexității de limitele impuse de fizică și chimie. În ciuda succesului lor, vor fi mereu forme „simple” de viață, motiv pentru care au rămas aproape neschimbate vreme de trei miliarde și jumătate de ani. Eucariotele sunt însă cu totul altceva. Indiferent cum s-a petrecut, apariția celulelor eucariote reprezintă o transformare excepțională.

Nu poate fi o coincidență faptul că organismele cresc spectaculos în dimensiuni curând după Marea Oxidare. Această legătură ține de domeniul speculației, dar accesul la oxigen și oxidarea carbonului

organic dizolvat pentru a obține energie se pare că a eliberat viața de constrângerile fizice și chimice. Eucariotele sunt o nouă direcție de evoluție a vieții.

De la unul la mulți

Evoluția celulelor eucariote complexe n-ar fi fost atât de spectaculoasă dacă nu ar fi existat alte „invenții" care să fi evoluat în timpul sau imediat după acest eveniment unic. Un bun exemplu e pluricelularitatea (vom vorbi curând și despre alte invenții). Înțeleg prin asta faptul că mai multe organisme unicelulare s-au asociat pentru a forma organisme pluricelulare complexe. Cuvântul „pluricelular" are însă mai multe sensuri. Comunitățile (sau „coloniile") de bacterii și arhee care formează pelicule sau „smocuri" de mari dimensiuni și împărtășesc o relație simbiotică pot fi considerate o formă de viață pluricelulară. În acest sens, viața pluricelulară era deja prezentă la comunitățile de tip cianobacterie care au lăsat urme fosile acum 3,5 miliarde de ani. Am putea spune că *Grypania spiralis* și alte alge mai vechi de un miliard de ani prezintă un fel de pluricelularitate, dar una primitivă. La celălalt capăt al spectrului se află plantele și animalele complexe, care au dezvoltat un tip mult mai sofisticat de pluricelularitate: posedă celule specializate pentru diferite funcții (celule neuronale, sanguine, hepatice, epiteliale etc.) și mecanisme chimice și electrochimice complicate care transmit informații între ele. Aceste celule posedă aceeași informație genetică (fac parte dintr-un singur organism), iar specializarea lor e determinată de mediul biochimic.

Ar fi util să trasăm o graniță între cele două extreme. Desigur, organismele unicelulare simple formează comunități pluricelulare cu un grad mic de diferențiere celulară. De pildă, comunitățile sferice de alge își poziționează celulele cu flageli – structuri filamentoase folosite pentru propulsarea comunității prin ocean – în exteriorul sferei, acolo unde e nevoie de ei. Celulele din interior sunt spori, care dețin informația genetică și au capacitatea reproductivă prin care organismul își transmite genele urmașilor. Adevărul e însă că celulele din interior sunt aceleași cu cele din exterior, numai că se află în etape diferite din ciclul vieții. În acest caz, diferențierea celulară ține de *timp* și nu de tip.

Deși foarte rară, o diferențiere celulară mai sofisticată la procariote nu e imposibilă. După cum am văzut, cianobacteriile fixează carbonul prin fotosinteză, producând oxigen. Dar aceste bacterii au nevoie să fixeze și azotul molecular, N_2, pentru a–și construi proteine. Aici apare o problemă: enzima implicată în fixarea azotului e inhibată de prezența oxigenului. Cianobacteriile unicelulare nu pot fotosintetiza și fixa azotul în același timp. Unele bacterii fotosintetizează ziua și fixează azotul noaptea. La alte organisme pluricelulare, cum ar fi *Nostoc punctiforme,* lipsa azotului transformă o celulă la fiecare 9–15 celule. Aceste celule, numite heterociști, își construiesc pereți suplimentari și, nelăsând să între oxigenul în interior, creează un mediu anaerob. De asemenea, ele dezactivează Fotosistemul II (dar păstrează Fotosistemul I), iar astfel organismul își împarte munca între diferite celule: unele se ocupă de fotosinteză, altele de fixarea azotului. Pentru supraviețuire, avantajele unor asemenea comunități sunt evidente, însă dacă mediul se schimbă și devine mai favorabil, unele celule pot reveni la tipul inițial, părăsind comunitatea și întorcându-se la viața unicelulară. E o simbioză din interes, fără un angajament ferm.

„Adevărata" pluricelularitate e rezultatul unei simbioze la o scară mult mai mare, implicând dezvoltarea unor celule care nu pot supraviețui pe cont propriu. Indiferent de condiții, ele nu mai pot părăsi „comunitatea". Asemenea celule sunt dedicate bunăstării organismului (cu unele excepții, despre care vom vorbi curând).

Cum s-a întâmplat asta? Răspunsul nu e simplu. S-a afirmat că organismele pluricelulare au evoluat din strămoși unicelulari de cel puțin 25 de ori în istoria vieții pe Pământ, iar tranziția la pluricelularitate e o strategie folosită și în prezent de organismele unicelulare aflate sub presiunea selecției. Pentru organismele care au evoluat în fluvii și oceane, pluricelularitatea a fost probabil rezultatul diviziunii celulare incomplete provocată de o mutație genetică. Așa cum am văzut, organismele unicelulare primitive se reproduc prin donare, adică produc celule–fiică identice genetic, care apoi se separă. Separarea incompletă lasă celulele–fiică „lipite" între ele, formând o structură extinsă. Poate că n-a existat un avantaj evolutiv imediat pentru organismele mutante, dar apariția altei invenții a evoluției,

cuplată cu creşterea concentraţiei de oxigen, a făcut ca dimensiunea să conteze într-adevăr.

Prădătorii și prada

Invenţia *este fagocitoza* – simplu spus, capacitatea unei celule de a absorbi o alta și de a o folosi ca sursă de hrană. Dar nu e oare același lucru cu endosimbioza, mecanismul care a dat naștere primelor eucariote? Da și nu. Originea celulelor eucariote implică absorbţia celulelor bacteriene într-o gazdă arhee, pentru a forma organite cum sunt mitocondriile și cloroplastele. A fost un eveniment decisiv și rarisim, de tip neodarwinist. Mecanismul darwinist obișnuit de experimentare prin „încercarea și eșecul" a nenumărate variaţii genetice și selecţie naturală nu se aplică. A fost un salt brusc (de aici „neo"), dar supus totuși presiunii selecţiei (deci „darwinist").

Fagocitoza – derivând dintr-o combinaţie de cuvinte grecești însemnând „a devora", „celulă" și „proces" – a evoluat printr-un mecanism darwinist tradiţional, probabil ca răspuns la penuria de carbon organic dizolvat. În loc să se hrănească cu cadavrele descompuse ale organismelor moarte, eucariotele s-au orientat spre cele vii. Avem acum de-a face cu prădători și pradă.

Există argumente în favoarea ideii că, în acest stadiu al evoluţiei vieţii, fagocitoza nu era posibilă fără mitocondrii. Dacă așa stau lucrurile, atunci fagocitoza a fost o invenţie a celulelor eucariote. Un anumit tip de fagocitoză a creat pesemne o presiune evolutivă către pluricelularitate, pe baza logicii simple că organismele eucariote unicelulare care rămân lipite laolaltă după diviziunea celulară devin mai greu pradă.

Lucrurile încep să se limpezească. Nivelurile ridicate de oxigen, evoluţia celulelor eucariote complexe, unirea lor pentru a alcătui organisme pluricelulare și inventarea unei forme primitive de hrănire (fagocitoza) se combină, împingând evoluţia către organisme tot mai mari. E un avantaj să fii cel mai mare organism și să te afli în vârful lanţului trofic.

Creşterea dimensiunii și complexităţii aduc însă cu sine noi provocări. Ce se întâmplă dacă o mutaţie într-una dintre celulele diferenţiate o transformă dintr-un cetăţean loial într-un agitator revoluţionar,

amenințând viabilitatea întregului organism? Și ce se poate face împotriva pericolului tot mai mare al genelor săltărețe provenite din celulele bacteriene absorbite? Ele vor invada cromozomul celulei gazdă. Unele gene încorporate ar putea fi utile. Cele mai multe umplu ADN-ul gazdei cu deșeuri care pot fi tratate de spliceosomi. Unele gene riscă să fie chiar dăunătoare.

Metoda bacteriană de reproducere prin diviziune celulară nu face decât să replicheze cromozomul, producând clone identice, cu tot cu genele dăunătoare. Nu e greu de ghicit unde am ajunge. Într-o populație relativ mică, generațiile succesive pot acumula tot mai multe gene dăunătoare care ar duce la dispariție. Acest declin inevitabil se numește *clichetul lui Müller*, după americanul Hermann Müller, laureat Nobel. Lucrurile arată rău.

Sexul și moartea

Răspunsul la prima provocare e relativ simplu. Semnalele chimice ale oricărei celule care dezertează – celule mutante care nu mai acționează în vederea bunăstării întregului organism – sunt preluate de mitocondrii. Ele eliberează o serie de enzime proteolitice (sau caspaze) care ucid dezertorii. Acest mecanism se numește *apoptoză,* un tip de „moarte celulară programată", și a fost probabil importat în celulele eucariote de la endosimbionții bacterieni. Caspazele invadează celulele defecte în cascadă, o enzimă activând–o pe următoarea. Ele despică celula din interior, iar rămășițele lor sunt îndepărtate de fagocite. Se estimează că într-un om adult sunt exterminate zilnic prin apoptoză între 50 și 70 de *miliarde* de celule. Orice celulă dezertoare e sacrificată în interesul organismului, interes care înseamnă capacitatea lui de a se reproduce și a–și transmite genele următoarelor generații.

Ajungem astfel la a doua provocare. Pentru eucariote, reproducerea prin donare nu mai e viabilă, ea conduce la degradare genetică și, inevitabil, la extincție. Eucariotele își cresc șansele de supraviețuire dacă dezvoltă un mecanism diferit de propagare a genelor, care să amestece genele mai mult și mai rapid decât e posibil prin transferul orizontal de gene, asamblând aleator genomuri cu o proporție mai mare de gene „bune". Soluția e sexul.

Acesta nu e singurul motiv care poate fi găsit pentru inventarea evolutivă a sexului (deși e foarte convingător). Unele bacterii practică o formă rudimentară de reproducere sexuală, iar noi știm că ciclurile vieții sexuale apăruseră deja la organisme eucariote unicelulare. Dar sexul se impune la descendenții lor pluricelulari. Poate că n-a fost o invenție cu totul nouă, însă când presiunile selecției încep să împingă organismele pluricelulare spre dimensiuni și complexități tot mai mari, variația oferită de sex devine o metodă esențială de menținere și uneori sporire a „aptitudinii”[192] genetice, reparând ADN-ul și mascând efectele mutațiilor dăunătoare.

Iată cum funcționează. Organismele pluricelulare își diferențiază unele celule în celule sexuale – spermatozoizi și ovule. În reproducerea sexuată, aceste tipuri de celule se contopesc. Mai întâi sunt duplicați cromzomii ambelor celule. Aceasta nu se deosebește, în principiu, de primul pas al reproducerii bacteriene, cu deosebirea că avem acum cromozomi de la ambii „părinți” genetic distincți, așa încât duplicarea face să apară în total patru (2×2) cromozomi. Ceea ce se întâmplă în continuare e un extraordinar dans la genelor. Genele celor patru cromozomi se amestecă și se recombină, producând un set de patru cromozomi, fiecare fiind un ansamblu diferit de gene. Celula obținută se divide apoi și formează două celule fiice, care, la rândul lor, se divid. Rezultatul e patru celule „nepoate”, fiecare cu un cromozom conținând un amestec de gene moștenite de la ambii părinți.

Să presupunem că în mediul extern se ivește o situație în care două mutații genetice favorabile oferă avantaje clare pentru supraviețuire. Într-o populație de bacterii care se reproduc prin donare, simpla probabilitate face ca șansele de a apărea o mutație sau cealaltă să fie relativ ridicate, dar șansele ca ambele să apară împreună sunt foarte scăzute. Organismele având o mutație sau cealaltă nu interacționează decât printr-un întâmplător transfer orizontal de gene. Dacă organismele nu pot răspunde suficient de rapid prin generațiile succesive, presiunile selecției le pot împinge spre extincție.

Șansele de a dobândi ambele mutații favorabile, câte una de la fiecare părinte, sunt mult mai mari într-o populație care se reproduce sexuat. Desigur, și reciproca e adevărată, progeniturile pot acumula gene

defavorabile, dar e mai puțin probabil ca ele să supraviețuiască și să se reproducă. Concentrând genele „rele” în progenituri care apoi dispar, genele „rele” sunt eliminate, îmbunătățind aptitudinile genetice globale ale populației.

Nu trebuie să privim însă lucrurile în alb și negru, ca și cum doar genele „bune” s-ar acumula, în detrimentul celor „rele”. Aptitudinea genetică ține de statistică. La loteria evoluției, organismele sunt „răsplătite” supraviețuind suficient de mult pentru a se reproduce. Genele „bune” care fac cu putință acest lucru pot deveni ulterior în ciclul de viață al organismului gene „rele”, provocând boli asociate cu îmbătrânirea și conducând în cele din urmă la moarte (dacă organismul supraviețuiește atât de mult și nu cade pradă numeroșilor factori din mediul extern care încearcă să-l ucidă). Evoluției nu–i pasă de soarta finală a organismelor. Cele angajate în reproducerea sexuată la începutul vieții, într-un mediu bogat în nutrienți, e mai probabil să–și transmită genele urmașilor. Așa funcționează evoluția și acesta e singurul lucru de care îi pasă.

Creșterea diversității

Plasarea acestor invenţii ale evoluției pe axa timpului geologic nu–i o sarcină ușoară, dar putem fi siguri că eucariotele, pluricelularitatea, fagocitoza, moartea celulară programată și reproducerea sexuată (și alte invenţii pe care nu le-am prezentat aici) au apărut în Proterozoic (figura 75). S-au petrecut multe lucruri, însă într-un timp foarte lung. Proterozoicul durează aproape două miliarde de ani, de la 2,5 miliarde la 540 de milioane de ani în urmă. Paleontologii numesc uneori perioada cuprinsă între 1,8 și 0,8 miliarde de ani „miliardul plictisitor”.[193]

E drept că nu sunt multe de văzut în arhiva fosilelor, cel puțin în comparație cu ce urmează să se întâmple. Deși biologii dezbat încă anumite aspecte de detaliu (originea pluricelularității și a sexului, de pildă), avem motive temeinice să credem în veridicitatea de ansamblu a acestei istorii evolutive. Voi prezenta câteva dintre ele.

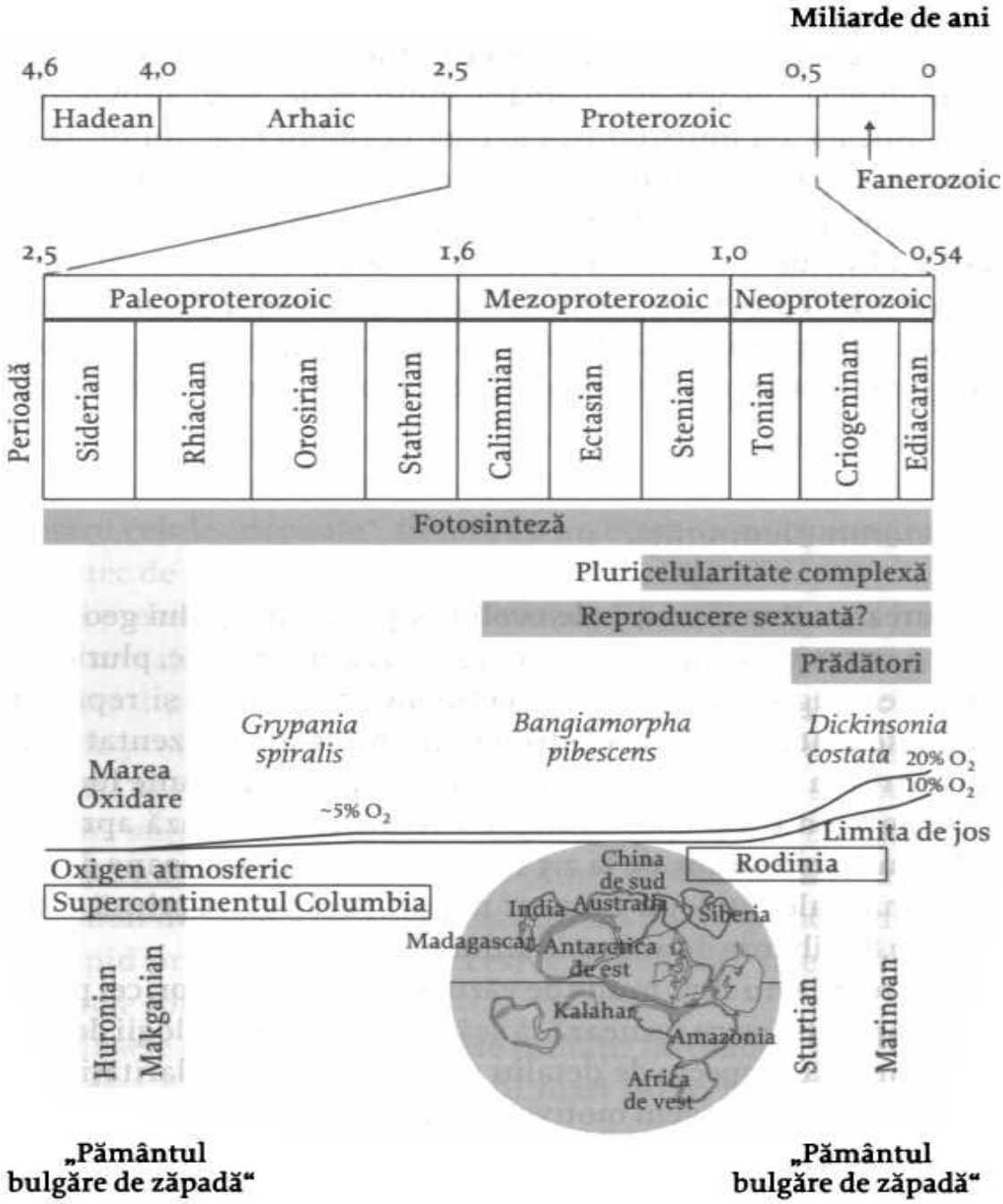


Figura 75. *Încercare de a așeza invențiile evolutive, organismele fosile și evenimentele geologice pe scara timpului din Proterozoic. Evoluția accelerează dezvoltarea diversității, ducând în cele din urmă la primele animale, ca rezultat al modificării continentelor, creșterii nivelului de oxigen în atmosferă și oceane și al episoadelor glaciare („Pământul bulgăre de zăpadă").*

De la fosilele de *Grypania spiralis*, cu o vârstă de 1,9 miliarde de ani, menționate mai sus, să facem un salt de 700 de milioane de ani până la

sfârşitul Mezoproterozoicului şi la fosilele de *Bangiamorpha pubescens,* descoperite în Formaţiunea Hunting, deasupra Cercului Arctic, în Canada. Acestea oferă dovezi clare privind existenţa unor organisme pluricelulare asemănătoare algelor roşii fotosintetizante actuale, ale căror specii sunt răspândite în mediile marine. Ele posedă celule reproducătoare şi celule „suport", celule aderente de tip rădăcină prin care organismul se fixează de roci. Algele roşii aparţin „supergrupului" taxonomic al *plantelor,* care include de asemenea algele verzi şi bine cunoscutele plante de uscat.

Alt exemplu este *Paleovaucheria clavata,* înrudită cu algele brune, descoperită în seria stratigrafică Lahanda veche de 1 miliard de ani din Siberia şi în Formaţiunea Svanbergfjellet veche de 750 de milioane de ani din Spitsbergen, în Norvegia. În Formaţiunea Svanbergfjellet s-a găsit şi *Proterocladus major*, o algă verde. Microfosile în formă de vază, considerate a fi diferite specii de amibe cu cochilie, au fost descoperite în Grupul Chuar vechi de 750 de milioane de ani, din Marele Canion, şi în alte straturi vechi de 740–800 de milioane de ani. Se crede că aveau o cochilie rigidă din materiale organice.

La începutul Neoproterozoicului, eucariotele au evoluat şi s-au diversificat în fungi, câteva specii de amibe, alge roşii şi verzi, precum şi multe alte forme. Au urmat două perioade ale „Pământului bulgăre de zăpadă" durând milioane de ani: glaciaţiunea Strutiană (720–660 milioane de ani în urmă), iar apoi glaciaţiunea Marinoană, care se estimează că a durat 4–5 milioane de ani.[194] Aceste episoade s-au petrecut Neoproterozoic şi definesc o perioadă numită Criogenian.

Nu e limpede ce a declanşat aceste glaciaţiuni. S-ar putea să fi fost vorba de acumularea continuă a oxigenului atmosferic şi de efectul lui asupra gazelor cu efect de seră cum e metanul, împreună cu formarea şi fragmentarea ulterioară a supercontinentului Rodinia, format în jurul ecuatorului. Pe măsură ce planeta se răcea încă o dată, e posibil să se fi format gheţari la ecuator, acolo unde radiaţia solară e cea mai puternică (însă cu 6% mai slabă decât în prezent), iar efectul de albedo al gheţii să fi răcit şi mai mult planeta.

Arhiva fosilelor ne arată că viaţa pe Pământ s-a ascuns în aşteptarea unor condiţii mai bune. De pildă, putem vedea alge marine excelent

conservate, ca florile dintr-un ierbar, în Formațiunile Doushantuo din provincia chineză Guizhou, cu o vechime de 635–551 de milioane de ani. Dar, cum se spune, în orice rău se află și un dram de bine. Deși nu știm cu certitudine ce s-a întâmplat, ne putem închipui un scenariu plauzibil. Condițiile din timpul glaciațiunii Sturtiene permit acumularea în atmosferă a dioxidului de carbon și metanului din activitatea vulcanică de-a lungul a 30 de milioane de ani, captând căldura și încălzind iarăși Pământul. Când gheţarii se retrag, rămâne expus mai mult uscat, iar efectul de albedo e inversat.

Sedimentele bogate în fosfor și alți nutrienți esențiali vieții sunt eliberate de gheţari și se scurg în oceane, iar atmosfera din nou bogată în dioxid de carbon declanșează explozia cianobacteriilor fotosintetizante. Nivelurile de oxigen cresc ameţitor, atingând valorile actuale și pătrund și mai adânc în ocean. Preţul plătit e un nou ciclu de răcire, glaciațiune și încălzire, dar la sfârșitul Criogenianului nivelurile de oxigen sunt mai ridicate ca oricând, și începe o nouă rundă de evoluție frenetică a eucariotelor.

Radiația din Ediacaran și primele animale

E posibil să fi existat un supercontinent cu viață scurtă – numit Pannotia –, format cu vreo 600 de milioane de ani în urmă, după fragmentarea Rodiniei. Dacă așa stau lucrurile, a fost un supercontinent „accidental", creat prin ciocnirile oblice ale principalelor plăci tectonice. S-a scindat după circa 60 de milioane de ani, la limita dintre Ediacaran și Cambrian, formând patru mari continente, numite Laurenția, Baltica, Siberia și Gondwana, precum și fragmente mai mici.

Asemenea mișcări tectonice pot avea efecte devastatoare, coborând și apoi ridicând nivelul mării, eliberând apele neoxigenate din adâncul oceanelor și umplând atmosfera cu dioxid de carbon și alte gaze vulcanice nocive. În acest timp avem de-a face cu o nouă eră glaciară, numită glaciaţiunea Gaskiers, în care Pământul nu devine totuși un „bulgăre de zăpadă". A durat „doar" câteva milioane de ani, cu vreo 582–580 milioane de ani în urmă.

Echilibrul dintre oxigen și carbon în oceane și în atmosferă e foarte delicat. Organismele vii preferă să fixeze izotopul ^{12}C, mai răspândit, iar

această selectivitate e transferată și rămășițelor organismelor. Oxidarea rămășițelor restabilește pur și simplu raportul dintre ^{12}C și ^{13}C din dioxidul de carbon din atmosferă. Dacă însă rămășițele sunt îngropate în sedimente, raportul nu mai poate fi restabilit, iar dioxidul de carbon din atmosferă se îmbogățește cu 13C, care în cele din urmă e adus de ploi pe Pământ, pentru a forma depuneri de carbonat de calciu. După cum știm, îngroparea carbonului permite oxigenului să se acumuleze (pentru că nu mai are prea multă materie organică moartă cu care să reacționeze). Raportul $^{13}C/^{12}C$ din rocile carbonate ne oferă deci un indiciu privind cantitatea de carbon îngropată și nivelurile oxigenului în atmosferă și oceane.

Raportul dintre izotopi arată că Ediacaranul a fost o perioadă de mari salturi în ciclul carbonului. „Fluctuația" Shuram, numită după Formațiunea Shuram din Oman, e una dintre cele mai mari fluctuații ale raportului $^{13}C/^{12}C$ din câte cunoaștem. A avut loc la mijlocul Ediacaranului, moment în care fie cantitatea de carbon îngropat a scăzut mult, fie a fost eliberat masiv material îmbogățit cu ^{12}C. E greu de găsit o explicație, dar e posibil ca atunci când oxigenul se infiltrează în ocean să fie oxidat un rezervor uriaș de carbon organic dizolvat, eliberându-se carbon îmbogățit cu ^{12}C.[195]

Ratele ridicate de carbon îngropat au fost apoi restabilite, iar nivelurile oxigenului atmosferic au crescut din nou. Niveluri ridicate ale oxigenului înseamnă acces la mai multă energie, încurajând creșterea în dimensiune.[196] S-ar putea de asemenea să fi declanșat ceea ce biologii numesc „radiație" – o perioadă frenetică de evoluție și diversificare a speciilor.

Din perspectiva noastră umană, deosebit de interesantă e apariția primelor *animale* în arhiva fosilelor. Printre acestea se numără fosile considerate a fi rude ale spongierilor și cnidariilor, grupul care include anemone de mare, meduze și corali (deși aceste afinități sunt încă sub semnul întrebării). Fosilele găsite în Formațiunea Doushantuo au fost interpretate ca *embrioni* ai unor specii de animale necunoscute. Fosilele cu forme ciudate din Grupul Nama din Namibia, vechi de 550–543 milioane de ani, dau și ele bătăi de cap, după cum spunea în 2003 paleontologul american Andrew Knoll:[197]

Dacă examinăm atent gresiile de la Nama – de preferință după–amiaza târziu, când lumina oblică a Soarelui pune în relief trăsăturile suprafeței – vedem fosile care se deosebesc frapant de orice găsim în alte roci. [...] Vedem amprentele unor organisme mari și complicate, precum și urmele și dârele lăsate fără îndoială de animale. Într-adevăr, fosilele de la Nama sunt șocante indiferent dacă le abordăm de sus sau de jos, fiindcă n-au omologi în straturile mai vechi, după cum nu seamănă nici cu fosilele găsite în rocile din Cambrian sau mai recente. Se pune deci întrebarea: remarcabilele fosile de la Nama și din alte roci din Proterozoicul târziu reprezintă oare strămoși ai animalelor moderne sau experimente evolutive eșuate de la începuturile evoluției animalelor?

Una dintre primele fosile dinainte de Cambrian care i-a intrigat pe paleontologi a fost descoperită de elevul Roger Mason într-o carieră din apropierea satului Woodhouse Eaves, în pădurea Chamwood din Leicestershire, Anglia. A fost numită *Charnia masoni* și seamănă cu o ferigă, având segmente care se ramifică alternativ la stânga și la dreapta. Pare o formă de algă sau de plantă, dar rocile în care a fost găsită arată că trăia în ape adânci, unde nu putea ajunge lumina Soarelui. Acest organism nu putea fotosintetiza, deci e posibil să fi fost un animal primitiv, un fel de ciupercă sau poate un experiment evolutiv care n-a supraviețuit Ediacaranului. În Australia, Newfoundiand și Rusia au fost descoperite alte exemple de *Charnia*, precum și alte tipuri de fosile asemănătoare ferigilor (de pildă, *Fractofusus misrai,* descoperită în 1967 la Mistaken Point, Newfoundiand – figura 76).

Exemplul tipic de fosilă din Ediacaran este *Dickinsonia costata.* A fost descoperită cu zece ani mai devreme de Reginald Sprigg, în Ediacara Hills, un lanț de dealuri din sudul Australiei (figura 77). Sprigg a numit organismul fosil după Ben Dickinson, directorul minelor din Australia de Sud. El crezuse că rocile pe care le examina erau de la începutul Cambrianului, iar abia după ce *Charnia* a fost descoperită a revenit la *Dickinsonia*.

S-au găsit și alte exemple de *Dickinsonia*, cu lungimi cuprinse între câțiva milimetri și un metru și jumătate, și grosimi de câțiva milimetri. Ce erau ele? Unii paleobiologi susțin că erau viermi inelați, cu un corp segmentat, bilateral, și un intestin central. Dovezile par să sugereze însă

că aceste ființe stăteau nemișcate pe suprafața sedimentelor, un comportament deloc specific viermilor. Knoll bănuiește că erau cnidarii primitive, cu un strat extern de țesut celular (epiteliu) înconjurând o materie gelatinoasă relativ inertă. Posibili echivalenți moderni sunt organismele pluricelulare simple din încrengătura Placozoa, care trăiesc pe fundul mărilor.

Când organismele încep să se mănânce unele pe altele, apar diferite strategii de apărare. Ființe asemănătoare viermilor se ascund săpând găuri, ceea ce provoacă o creștere spectaculoasă a *bioturbației*, o forare a sedimentului care îi schimbă textura și lasă urme fosile. Apariția speciilor *Cloudina* și *Namacalathus* la sfârșitul Ediacaranului aduce cu sine răspândirea *biomineralizării,* capacitatea de a produce țesut mineralizat dur, format din carbonat de calciu și fosfat de calciu, pentru a proteja țesutul moale din interior. N-a fost o nouă invenție, dar s-a dovedit a fi un mecanism de supraviețuire ingenios.

Ființele „biomului”[198] din Ediacaran reprezintă un moment unic în evoluția vieții pe Pământ. A durat trei miliarde și jumătate de ani ca să se ajungă de la LUCA la primele plante și animale, trecând prin fotosinteză, bacterii, arhee, endosimbioză, pluricelularitate, fagocitoză, reproducere sexuată, moartea programată a celulelor, biomineralizare și multe alte invenții ale evoluției. Pământul a jucat un rol crucial în această

Figura 76. **Fractofusus misrai** *a fost numită după geologul indian Shiva Balak (SB) Misra, care era student pe când a descoperit o colecție bogată de fosile din Ediacaran la Mistaken Point, în Newfoundland, Canada, în iunie 1967. Zona unde a fost făcută această fotografie e în prezent protejată și face parte din Rezervația Ecologică Mistaken Point. Această fosilă are aproximativ 10 centimetri lungime și o vechime de 565 milioane de ani.*

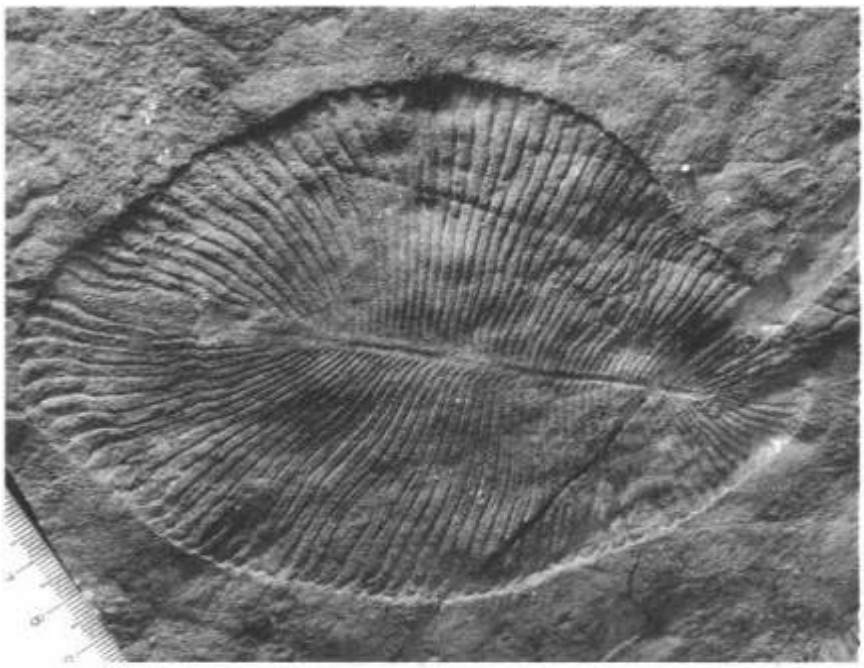


Figura 77 **Dickinsonia costata** *a fost descoperită în Ediacara Hills, din sudul Australiei, în 1974. Se crede că erau cnidarii primitive, o încrengătură care include meduzele, coralii și anemonele de mare, și că trăiau în colonii. N-au supraviețuit mult după sfârșitul Ediacaranului.*

poveste, și e limpede că viața și planeta sunt indisolubil legate. Viața are acum cale liberă. S-ar putea ca animalele din Ediacaran să nu fi fost un experiment evolutiv eșuat, deși n-au supraviețuit – cu foarte puține excepții, fosilele din Ediacaran nu se mai regăsesc în Cambrian.

Nu e clar ce se petrece în continuare, dar dovezile privind o nouă fluctuație a raportului izotopilor de carbon și studiul urmelor diferitelor elemente arată că la sfârșitul Ediacaranului oxigenul din oceane *se epuizase.*[199] Nu știm exact de ce, dar există câteva mecanisme geologice prin care apa săracă în oxigen și bogată în dioxid de carbon din adâncul oceanului e adusă la suprafață. Deplasarea continentelor și mărilor e posibil să fi jucat și ea un rol – avem pesemne de-a face cu cauze multiple. Oricum însă, nu încap îndoieli asupra consecinței – extincția în masă. Aproape toate animalele din Ediacaran dispar. „Scurta" lor domnie de 20 de milioane de ani se încheie.

Viața pare uneori fragilă, dar istoria vieții pe Pământ ne arată că e imposibil să fie complet distrusă. Unele forme de viață rezistă. Și, într-un scenariu pe care îl vom vedea repetat în următorul capitol, acele

forme de viață care supraviețuiesc vremurilor grele se trezesc într-o ecologie aproape pustie. Când reapare oxigenul, evoluția începe *cu adevărat* să funcționeze.

10
Cântec de gheață și foc

Originea speciilor

Mă rog, am exagerat poate cu subtitlul, să zicem că e o licență poetică. Capitolul de față tratează despre ciclurile erelor glaciare succesive, teribile erupții vulcanice și cel puțin o ciocnire cu un asteroid, toate desfășurate în cursul a 475 de milioane de ani, începând cu Cambrianul. Acest cântec de gheață și foc a schimbat fața Pământului de mai multe ori, a provocat câteva extincții în masă și radiații evolutive, conducând la creșterea diversității unor forme de viață animală.

Așadar, capitolul de față *nu* se ocupă de „originea speciilor" ca atare. Până în acest moment, diferite specii au apărut deja în oceanele Pământului vechi de patru miliarde de ani, iar în capitolul precedent am examinat unele dintre ele. De asemenea, îmi voi concentra aici atenția asupra *animalelor,* dar „Originea și diversificarea încrengăturilor animale" nu sună prea bine.

Desigur, titlul face trimitere la seria de romane fantastice ale autorului american George R.R. Martin, care se deschide cu *Urzeala tronurilor*, iar subtitlul e inspirat de celebra carte a lui Darwin. Darwin era perfect conștient de problemele cu care se confrunta teoria evoluției prin selecție naturală. El privea evoluția ca un mecanism care funcționează treptat, de-a lungul a nenumărate generații, dar la vremea aceea nu se descoperise încă nicio fosilă precambriană.[200] Nedumerit, Darwin scria: „Nu pot da un răspuns satisfăcător la întrebarea de ce nu găsim depozite fosilifere bogate din aceste presupuse perioade extrem de vechi, anterioare sistemului cambrian."[201]

De fapt, cunoscutul naturalist britanic David Attenborough a studiat la Liceul Wyggeston din Leicester cu câțiva ani înaintea lui Roger Mason și s-a plimbat prin pădurea Chamwood înaintea acestuia. Deși pasionat vânător de fosile, Attenborough nu s-a gândit să le caute în Chamwood,

odată ce rocile de acolo erau precambriene: „Orice geolog știa, sau cel puțin era convins, că roci atât de vechi nu pot conține vreo fosilă”.[202]

În Cambrian, organismele care mureau erau îngropate în noroi și sedimente, și se fosilizau. Paleontologilor li se părea că viața a izbucnit brusc, ceea ce contrazicea evoluția treptată. Aceasta e *radiația cambriană,* o perioadă de experimentare evolutivă atât de frenetică în termeni geologici, încât, deși știm că urmează unei lungi istorii de dezvoltare evolutivă care a lăsat urme în arhiva fosilelor, merită pesemne să fie numită „explozie”.

Vom urmări aceste evoluții concentrându–ne asupra animalelor, despre care avem dovezi că au apărut în Ediacaran. Să începem deci cu localizarea animalelor în arborele vieții. Figura 78 prezintă imaginea de ansamblu a relațiilor filogenetice stabilite în 1990 de Woese și colegii săi. Am văzut deja o parte din ea (figura 71), dar o completăm acum Eukarya, domeniul tuturor organismelor eucariote.[203][204]

Figura 78 arată că Eukarya sunt mai strâns înrudite cu Archaea decât cu Bacteria, și, într-adevăr, dacă endosimbioza a avut loc așa cum credem, e perfect logic. Astfel, organismele eucariote puteau să fi moștenit mult din secvența lor de ARNr de la arheea gazdă. Dar au fost încorporate și unele gene de la endosimbionții bacterieni, o relație greu de reprezentat într-o asemenea diagramă.

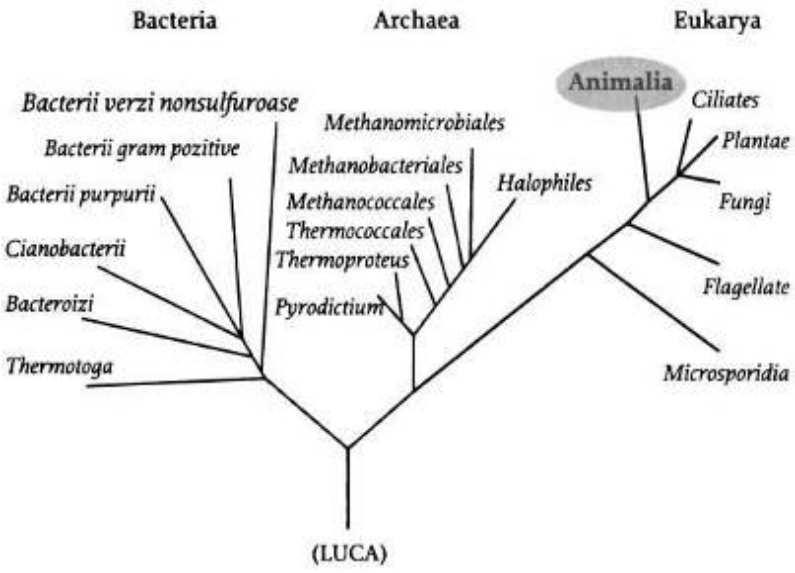


Figura 78. *Întregul arbore filogenetic al vieții publicat de Carl Woese și colegii săi în 1990 include Eukarya. Animalia (animale), Plantae (plante) și Fungi (ciuperci) sunt regnuri ale domeniului Eukarya pe care le cunoașteți. S-ar putea însă să nu aflat despre Ciliates, un grup de eucariote unicelulare cu organite în formă de perișori, numite cili. Flagellates sunt celule eucariote cu o structură filamentoasă numită flagel, cu ajutorul căreia organismul se deplasează (gândiți-vă la spermatozoid). Microsporidia sunt paraziți unicelulari. Amintiți-vă din figura 71 că ordinea ramificațiilor și lungimea ramurilor reflectă gradul de „înrudire" genetică a diferitelor forme de viață pe baza comparațiilor între secvențele de ARNr. Diagrama din figură a fost prima de acest tip, dar e acum depășită de studii bazate pe mai multe organisme și mai multe secvențe de gene, iar detaliile evoluției eucariotelor sunt puțin diferite. Apariția târzie a plantelor și animalelor rămâne însă în vigoare. Adaptat după Carl R. Woese, Otto Kandler și Mark R. Wheelis,* Proceedings of the National Academy of Sciences, *87 (1990), p. 4578.*

Explozia Cambriană

Desigur, drumul parcurs de la LUCA la biomul Ediacaranului e absolut minunat și reflectă interacțiunea subtilă dintre geologia Pământului, geochimie și organismele biologice care se străduiesc să supraviețuiască pentru a–și transmite genele următoarelor generații. Adevărul e însă că tot ce putem prezenta din 3,5 miliarde de ani de evoluție sunt câteva meduze și mici organisme cu cochilie.[205] E un exercițiu pasionant să privești în urmă. În virtutea faptului că te afli aici și citești această carte, viața animală trebuie să fi dezvoltat o diversitate și o complexitate incomparabile cu cele ale organismelor cu corp moale și mici cochilii din radiația ediacarană. Timpul trece, iar noi ne aflăm la doar 540 de milioane de ani de momentul actual. Evoluția trebuie să se urnească.

Și într-adevăr se urnește. Dar unde, cum și în ce direcție se deplasează depinde iarăși de mediul geologic creat de Pământul agitat și de sistemul solar. Nu–i o coincidență că asistăm la un eveniment crucial din istoria vieții într-un moment geologic crucial. Trecem de la Proterozoic („viață primitivă") la Fanerozoic („viață vizibilă"). Fanerozoicul se împarte la rândul lui în trei ere: Paleozoic („viață veche"), Mezozoic („viață medie") și Neozoic („viață nouă"). Motivul e simplu: înainte de a fi descoperite dovezi fosile pentru forme de viață mai vechi, geologii și paleontologii credeau că abia în Paleozoic viața a devenit vizibilă.

Așadar, ce anume s-a întâmplat la începutul Paleozoicului? Orice răspuns e inevitabil speculativ, dar dovezile fosile ne spun că a fost o perioadă remarcabilă de experimente evolutive. În câteva milioane de ani, viața a trecut de la forme simple la animale complexe cu diverse părți ale corpului, cum sunt segmente, picioare, antene, ochi, organe sexuale etc. Aceste invenții evolutive au fost sporite prin experimente vizând „planul corpului".

Ca o consecință simplă a mișcării (prin ocean sau pe fundul oceanului), corpul unui animal se „polarizează" în cap și coadă. Capul e partea corpului care întâlnește prima un nou mediu, deci e firesc ca acolo să se afle toate organele senzoriale. Mișcarea de înaintare definește „stânga" și „dreapta", stabilind un plan de simetrie. O asemenea structură cu cap, coadă și plan de simetrie longitudinal se numește *bilaterală,* „Planul corpului" este proiectul genetic pentru dimensiunea și așezarea părților corpului. Asamblarea acestor părți e reglată de un număr uimitor de mic de gene, numite gene Homeobox (sau „Hox"). Oamenii au doar 39 de gene Hox, organizate în patru grupuri pe patru cromozomi.

De ce atât de puține? Pentru că sunt gene de comandă și control. Ele acționează ca întrerupătoare, activând sau dezactivând sute de alte gene, care apoi specifică felul în care să se diferențieze și unde să se ducă celulele embrionului de animal. Embrionul se divide întâi în partea din față și partea din spate, reflectând tiparul în care genele sunt organizate fizic pe cromozom. Embrionul e apoi segmentat prin acțiunea proteinelor Hox produse de ARN, în funcție de secvențele de

nucleotide specificate de genele Hox. Alte gene diferențiază pe urmă celulele, iar astfel se formează structuri complicate pe fiecare segment.

Mare parte din ce știm despre genele Hox provine studiul musculiței de oțet, *Drosophila melanogaster.* Pentru descoperirea și clasificarea acestor gene, Edward Lewis, Christiane Nusslein–Volhard și Eric Weischaus au primit în 1995 Premiul Nobel pentru Fiziologie sau Medicină. În general, cu cât un organism e mai simplu, cu atât setul de gene Hox e mai simplu (musculița de oțet are opt, grupate pe două segmente ale aceluiași cromozom) – dar există și excepții de la regulă. Aceleași gene sau unele foarte asemănătoare se găsesc la toate animalele, chiar și la meduze, ceea ce sugerează că acest sistem era deja prezent în ADN-ul ultimului strămoș comun din Ediacaran al animalelor pe cale să apară în explozia cambriană.

Sistemul se dovedește foarte ingenios când extincția în masă de la sfârșitul Ediacaranului creează ceea ce Knoll numește o „ecologie permisivă”:[206]

Prin „permisiv” înțeleg un peisaj ecologic în care competiția pentru resurse e rară sau slabă. (Nu–i nevoie să fii bun ca să câștigi jocul evoluției: trebuie doar să fii mai bun decât ceilalți concurenți). Ecologiile permisive pot apărea pentru că schimbările de mediu fac posibile noi fiziologii, sau pentru că o noutate evolutivă permite organismelor să exploateze resursele într-un mod nou, fie el cât de stângaci. Catastrofele de mediu oferă o rută alternativă – populațiile care supraviețuiesc extincției în masă pot radia în golul ecologic care urmează [...].

Mutațiile în genele Hox pot conduce la structuri corporale bizare. De pildă, o mutație destul de răspândită la musculițele de oțet face ca antenele să devină picioare.[207] Mutațiile în genele Hox pun evoluției întrebări critice privind adaptabilitatea și capacitatea de supraviețuire a organismului rezultat. Are rost să punem acolo un picior sau un ochi? Nu e greu de imaginat că, atunci când evoluția își experimentează sistemul de dezvoltare, se vor naște ființe cu unele mutații stranii și minunate, care probabil n-ar supraviețui într-o ecologie mai puțin permisivă.

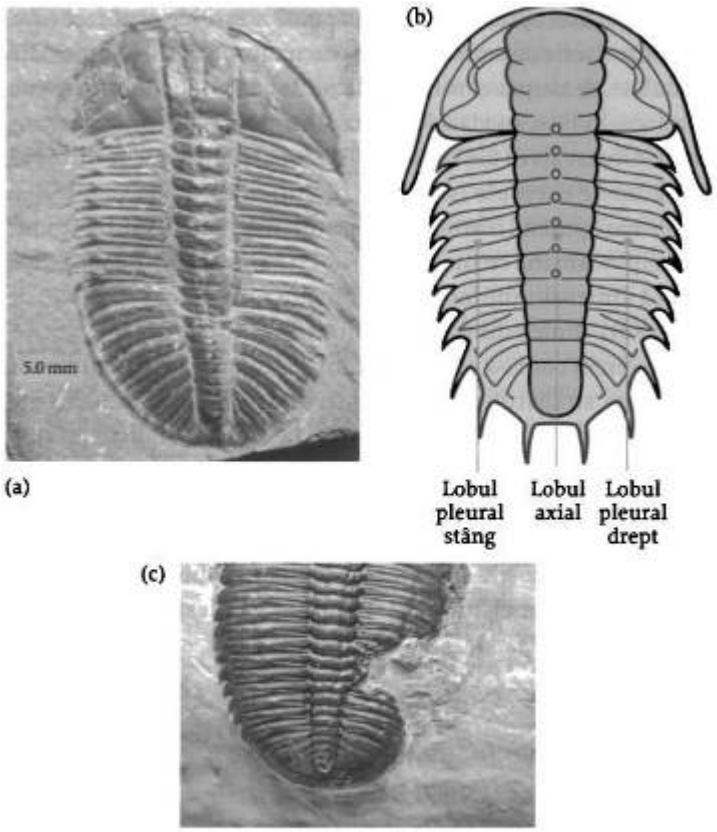


Figura 79. *(a) Fosila unui trilobit din Cambrianul mijlociu. (b) Schemă reprezentând principalele părți exterioare. (c) Acest trilobit prezintă o urmă de mușcătură.*

Un asemenea mediu prietenos nu poate dura însă la nesfârșit. Mările de mică adâncime conțin acum mai mult oxigen, iar accesul la această sursă de energie oferă noi posibilități. Mediul devine imediat mult mai *ostil.* Evoluția răspunde selectând organismele mai capabile să–și prade victimele și să se protejeze mai bine de prădători. Rezultatul e un fel de cursă a înarmărilor, când animalele încep să se „înzestreze". Sunt instalate picioare pentru a înainta spre prada imprudentă sau pentru a o rupe la fugă. Se dezvoltă ochi și antene pentru a localiza mai bine prada sau prădătorul. Biomineralizarea își intră în drepturi, căci organismele își ascund părțile moi și vulnerabile ale corpului sub o carapace dură.

Este o lume a *artropodelor,* cu corpuri segmentate, picioare articulate, ochi, antene și un schelet extern (exoschelet). Există și alte ființe, iar nu toate au cochilii, însă grație naturii și compoziției lor, cochiliile au mult mai multe șanse de a se păstra în arhiva fosilelor (în fond, ele sunt deja mineralizate). Proliferarea organismelor cu cochilii e unul dintre

motivele pentru care paleontogii credeau înainte că viaţa s-a declanşat brusc în Cambrian. Un bun exemplu de animal marin e *trilobitul*, care apare pentru prima dată la 20 de milioane de ani de la începutul Cambrianului. Fosile de trilobiţi se găsesc aproape pretutindeni, întinzându-se pe o perioadă de circa 270 de milioane de ani (figura 79). Carapacea, alcătuită din carbonat de calciu aşezată pe o reţea de chitină (un polimer cu catenă lungă derivat din glucoză), are trei lobi, de unde numele trilobiţilor. Aceştia sunt ilustraţi în figura 79(b).

Sub lobul axial se află creierul primitiv al organismului şi tractul digestiv. Pe cap sunt un set de antene (nu se văd în figură) şi doi ochi formaţi din cristale de carbonat de calciu, orientaţi de-a lungul axei optice. În spatele capului se extinde un torace compus dintr-o serie de segmente, fiecare cu câte o pereche de picioare articulate, deasupra cărora se află un set de branhii ascunse sub carapace. În fine, coada e formată dintr-o serie de segmente contopite. Observaţi că deşi de regulă doar părţile dure se fosilizează, există unele exemple (rare) de trilobiţi la care s-au fosilizat şi părţile moi, putând fi astfel reconstituit în detaliu planul corpului. Trilobiţii seamănă cu molia zidurilor (*Oniscus asellus*), dar trebuie spus că dimensiunile lor variau între un milimetru şi peste 70 de centimetri, dimensiunile tipice fiind de 3–10 centimetri.

Indiferent cum s-a petrecut, e limpede că în doar 20 de milioane de ani am străbătut un drum extrem de lung de la meduze şi animale mici cu cochilie. Figura 79(c) ne oferă un indiciu privind motivul pentru care asemenea organisme au evoluat rapid. În ciuda carapacei protectoare, acest trilobit a fost atacat de un prădător mai mare. Are o urmă de muşcătură în lobul pleural drept. Dovezile fosile sugerează că trilobiţii puteau supravieţui având bucăţi din ei rupte, cu condiţia ca acestea să se afle în spatele capului. Dar dacă trilobiţii erau vânaţi, cine îi vâna?

Ciudații (dar minunății) locuitori ai șisturilor din Burgess

Deşi trilobiţii n-au descendenţi în ziua de azi, ei ne par familiari. În planul corpului lor putem recunoaşte (măcar aproximativ) părţi pe care le vedem la fiinţe din prezent. Pentru a înţelege cum decurg experimentele efectuate de evoluţie, trebuie să mai avansăm cu câteva zeci de milioane de ani, până la mijlocul Cambrianului, adică în urmă cu 505 milioane de ani.

Închipuiți–vă o mare puțin adâncă bine oxigenată, la câțiva kilometri de țărmul nordic al Laurenției.[208] La mică distanță de coastă, în Oceanul Pantalasic, valurile se sparg de vârful unei stânci submarine aproape verticale, numită Escarpamentul Catedralei.

Stânca e de fapt un recif format din cianobacterii, iar baza ei se află la circa 100 de metri sub nivelul oceanului. Aici fundul de mare e compus din mâlul și aluviunile aduse de pe uscat, iar lumina Soarelui pătrunde cu greu. Unele animale trăiesc îngropate în mâl, altele sunt fixate ferm pe fundul mării, dar toate filtrează organismele microscopice purtate de curenți. Mai sunt și cele precum trilobiții, care se târăsc în căutare de hrană, sau cele care înoată deasupra, înfometate, cu ochii ațintiți asupra târâtorilor.

Lăsându–i la o parte pe trilobiți, ne-am putea închipui că aceste animale marine seamănă cu ceva cunoscut. Privind însă mai atent, vedem că multe dintre ele au forme stranii pe care nu le putem regăsi la nicio ființă din prezent. *Hallucigenia sparsa* seamănă cu un vierme îngroșat la cap (dar poate că e coada) care merge cu șapte perechi de picioare ca niște tentacule, iar pe spate are țepi (figura 80(a)). E un necrofag care se deplasează pe fundul noroios la mării în căutare de stârvuri. În apropierea lui se mișcă lent *Wiwaxia corrugata*, pesemne o rudă îndepărtată a moluștelor, cu părțile moi asemănătoare celor ale limacșilor sau melcilor, însă e acoperit cu o armură și are ghimpi meniți să-i descurajeze pe prădători (figura 80(b)).

Toate acestea sunt ciudate, dar iat–o pe *Opabinia regalis* (figura 80(c)). Când o schiță a ei a fost prezentată la o întrunire a Societății de Paleontologie din Oxford, a fost întâmpinată cu râsete, „probabil datorită stranietății acestui animal”.[209] Și ea merge pe fundul mării în căutarea viermilor pe care îi prinde cu trompa ei lungă. Nefericitul vierme e apoi înghițit de gura aflată în partea de jos a capului pe care se află *cinci* ochi mari. *Opabinia* e foarte precaută. Probabil e vulnerabilă la atacurile venite de deasupra, iar ochii sunt meniți s–o avertizeze din timp.

Înțelegem acum și de ce. Iată un trilobit străbătând în viteză fundul mării și tresărim când se năpustește de deasupra o formă mare, întunecată. După ce apa se limpezește, apare *Anomalocaris canadensis*,

un fel de crevete bizar, lung de vreo doi metri (figura 80(d)). A prins trilobitul cu cei doi apendici mari care–i ies din cap și își împinge victima către gura rotundă protejată de o armură.

Aceste animale își continuă lupta zilnică pentru supraviețuire fără să–și dea seama de pericolul iminent. Pe fundul mării au apărut din loc în loc fisuri și scobituri, semne ale instabilității provocate probabil de deplasarea plăcii nord–americane pe care se află Laurenția. Fără vreun avertisment, fundul mării se prăbușește. Mâlul prins de peretele escarpamentului devine instabil și începe să alunece. Mii de animale

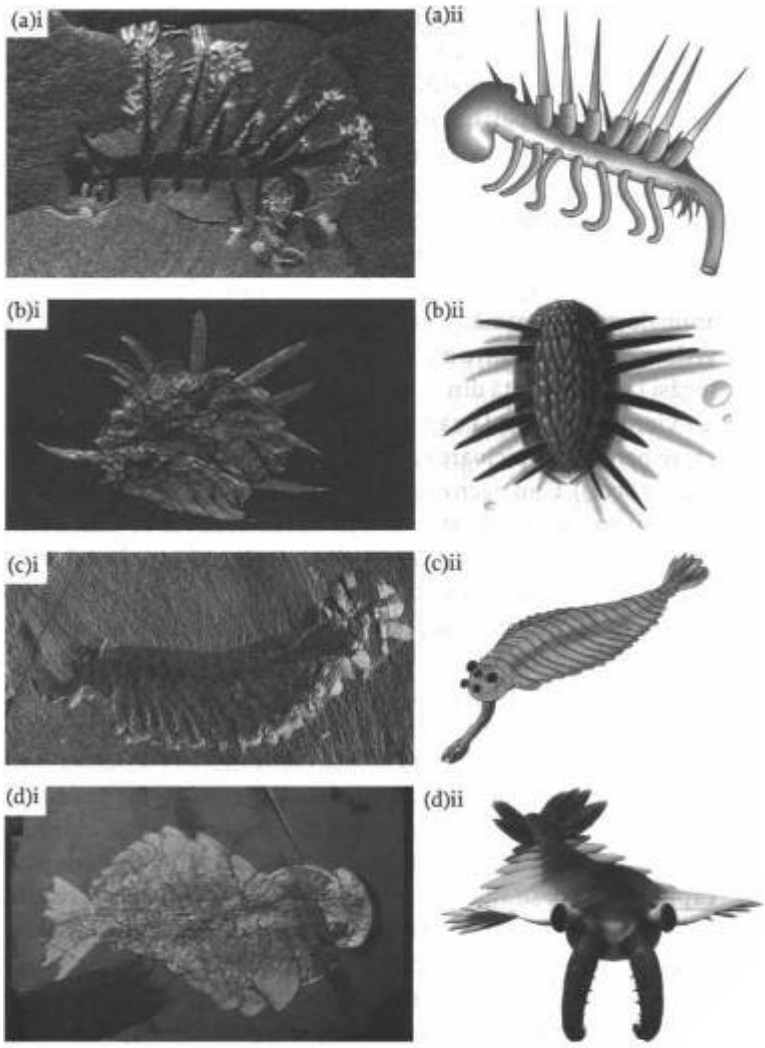


Figura 80. *Exemple de animale marine din Cambrian descoperite în șisturile din Burgess.* ***(a)*** **Hallucigenia sparsa.** ***(b)*** **Wiwaxia corrugata.** ***(c)*** **Opabinia regalis.** ***(d)*** **Anomalocaris canadensis.** *(În stânga – fosila, în dreapta – reconstituirea animalului.)*

sunt prinse în acest vârtej dens de mâl, trase în jos şi îngropate în diverse poziţii. În mod obişnuit, animalele se descompun destul de repede, proces mult accelerat de prezenţa oxigenului. Unele animale încep să putrezească, dar stratul de mâl de deasupra întrerupe alimentarea cu oxigen, iar carbonul din ţesuturi formează un polimer rezistent numit kerogen, care păstrează detaliile părţilor moi ale corpului. Începe apoi procesul de fosilizare.

Au trecut sute de milioane de ani. Laurenţia a devenit America de Nord. Fundul de mare în care e păstrată fauna cambriană se află acum în Munţii Stâncoşi din Canada, la peste 2500 de metri deasupra nivelului mării, în Parcul Naţional Yoho, lângă Banff şi Lacul Louise. Pentru a ajunge acolo trebuie să mergi întâi, cu maşina sau cu trenul, până în orăşelul Field, la 27 km de Lacul Louise, iar apoi să urci vreo 1000 de metri spre Trecătoarea Burgess.

Aici a observat paleontologul american Charles Doolittle Walcott, secretar al Institutului Smithsonian, o placă desprinsă în urma unei avalanşe, care prezenta o fascinantă colecţie de crustacee fosile. În august 1909, împreună cu soţia, fiica, fiul şi un asistent, a reuşit să găsească locul de unde se desprinsese placa, loc pe care l-a boteza apoi Şisturile din Burgess (Burgess Shale). Acestea s-au format din mâlul care înghiţise animale cambriene, în urmă cu 505 milioane de ani. Mâlul comprimat a prezervat nu numai părţile dure ale animalelor, dar şi pe cele moi.

Povestea descoperirii lui Walcott a fost spusă de paleontologul american Stéphan Jay Gould în cartea sa *Wonderful Life,* publicată în 1989. Walcott a introdus forţat fosilele găsite în grupe taxonomice cunoscute, ascunzând astfel minunata lor diversitate şi stranietate. Natura lor adevărată a ieşit la iveală în anii 1970 şi 1980, când au fost reexaminate de paleontologii Harry Whittington, Derek Briggs şi Simon Conway Morris de la Universitatea Cambridge.

Gould susţinea că marea diversitate a acestor animale impune revizuirea ideilor noastre despre evoluţie, însă echipa de la Cambridge nu era de acord şi, în ciuda vizibilei stranietăţi a animalelor de la Burgess, cercetări ulterioare au dezvăluit mai multe similarităţi cu artropodele decât diferenţe. Au fost de asemenea corectate unele erori:

Conway Morris reprezentase inițial *Hallucigenia* răsturnată, mergând pe țepi și cu un singur rând de tentacule orientate în sus. Alte fosile găsite ulterior la Changiang, în provincia chineză Yunnan, au arătat că *Hallucigenia* avea două seturi de tentacule, nu unul, ceea ce însă n–o făcea să arate mai puțin straniu.

Se crede acum că aceste bizare animale cambriene formează *grupuri filogenetice neramificate (stem groups).* Ele reprezintă dezvoltări sau experimente ale evoluției care au sfârșit printr-o extincție. Poate că ele au fost „fundături" evolutive, sau pur și simplu victimele unei serii de extincții provocate de fenomene geologice. De pildă, *Opabinia* și *Anomalocaris* erau pesemne înrudite cu strămoșii artropodelor. Ele au unele trăsături comune, dar nu toate, cu artropodele moderne, care includ crustacee precum crabii, homarii și creveții.

Un asemenea grup filogenetic formează în arborele vieții o singură ramură, care nu se continuă, nici nu dezvoltă noi ramuri. Dimpotrivă, un *grup filogenetic ramificat (crown group)* include ultimul strămoș comun și toți descendenții lui supraviețuitori (sau dispăruți), fiind o parte a arborelui vieții care radiază multe ramuri. Din această perspectivă, în ciuda bizareriei lor, animalele de la Burgess și fosile asemănătoare descoperite în Groenlanda și China sunt înrudite cu încrengături existente și nu reprezintă ceva complet diferit.

Cele cinci mari extincții în masă

Darwin nu era de acord cu afirmațiile privind extincția speciilor ca urmare a catastrofelor naturale. Deși pe când scria *Originea speciilor,* în arhiva fosilelor apăreau exemple de extincții în masă, el le respingea pe motiv că reflectau tendința de a suprainterpreta dovezile, care puteau fi fragmentare și incomplete. Darwin scria:[210]

[...]ignoranța noastră este atât de profundă și prezumția noastră atât de mare, încât ne minunăm când auzim despre pieirea unui organism, și deoarece nu înțelegem cauza acestei pieiri, invocăm cataclisme care pustiesc lumea, sau inventăm legi despre durata formelor de viață!

După cum bine știm, Darwin a fost gradualist. El privea extincțiile ca pe rezultatul natural al competiției dintre formele de viață într-o ecologie uneori riscant schimbătoare. Formele de viață cel mai bine adaptate

mediului schimbător e mai probabil să supraviețuiască, să procreeze și să–și transmită genele viitoarelor generații. Cele mai puțin adaptate e mai probabil să dispară. Știm acum că viața pe Pământ a fost profund modelată de o serie de cinci extincții în masă în cursul ultimilor 400 de milioane de ani, toate putând fi legate de mari prefaceri geologice.

Figura 81 prezintă evoluția numărului de genuri de animale marine din Cambrian până în prezent. În taxonomie, genurile se află cu o treaptă deasupra speciilor (de pildă, *Anomalocaris canadensis* e o specie din genul *Anomalocaris; Homo sapiens* e o specie din genul *Homo*). Graficul a fost obținut numărând genurile de animale marine din arhiva fosilelor la diferite momente din timpul geologic, folosind baza de date a paleontologului american J.J. Sepkoski care poate fi găsită pe site-ul Universității din Wisconsin.[211]

Rezultatul e uimitor. Desigur, există fluctuații ale numărului de genuri explicabile prin faptul că unele s-ar putea să nu fi lăsat urme sau să nu fi fost descoperite de paleontologi, dar e evident declinul spectaculos și foarte rapid în cinci momente–cheie (marcate cu săgeți). Aceste extincții în masă apar la sfârșitul Ordovicianului, către sfârșitul Devonianului și la sfârșitul Permianului, Triasicului și Cretacicului.

Extincția în masă de la sfârșitul Permianului e extrem de violentă. Se pare că în urmă cu vreo 252 de milioane de ani 90–95% din întreaga viață animală marină a dispărut. Viața migrase deja pe uscat, iar figura 81 nu ne spune nimic despre soarta animalelor terestre. Nu încape îndoială că și ele au fost supuse extincției în masă, dar nu par să existe dovezi în

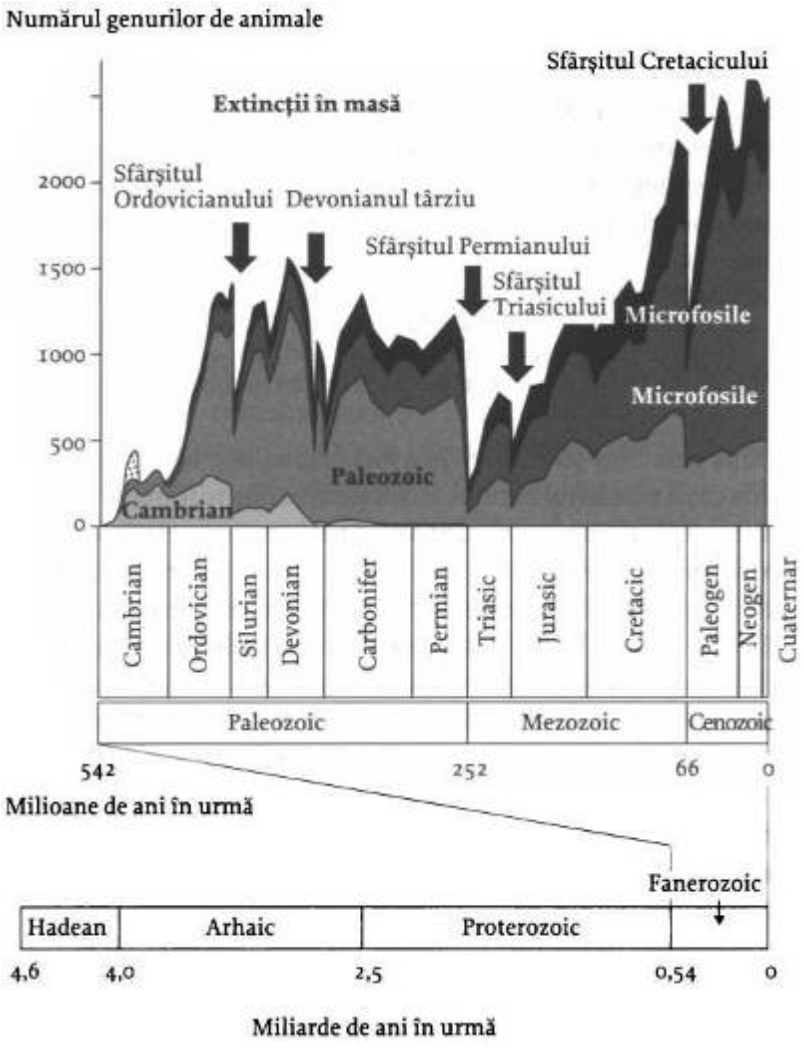


Figura 81. *Evoluţia genurilor de animale marine, de la începutul Cambrianului până în prezent, dedusă din arhiva fosilelor. Deşi viaţa marină a devenit mai diversă odată cu trecerea timpului (numărul genurilor a crescut), această tendinţă e întreruptă de o serie de scăderi spectaculoase, corespunzând extincţiilor în masă. Cele cinci mari extincţii în masă sunt marcate cu săgeţi. Adaptat după Sepkoski's Online Genus Database: http://strata.geology.wisc.edu/ jack/.*

sprijinul procentajului de 70%, adesea citat. Ultima extincţie în masă a avut loc în urmă cu circa 66 de milioane de ani, la limita dintre Cretacic şi Paleogen (numit în trecut Terţiar). Viaţa marină a avut din nou de suferit, dar evenimentul ne e cunoscut pentru că a dus la dispariţia dinozaurilor de pe faţa Pământului.

Figura 81 ne trezeşte la realitate şi ne face să reflectăm la fragilitatea vieţii pe un Pământ care poate fi deopotrivă ospitalier şi cumplit. Observaţi însă că după fiecare mare extincţie viaţa înfloreşte din nou.

Radiază. „Ecologia permisivă” creată prin dispariția a nenumărate forme de viață oferă evoluției spațiu să se desfășoare, iar în câteva milioane de ani, viața e iarăși prosperă și diversă. Vom vedea însă că tipurile de viață care se dezvoltă după o extincție în masă e probabil să fie foarte diferite de cele dinaintea ei.

Înverzirea lumii

Țin minte cum am fost sculat din pat la ora 3 a.m. în dimineața zilei de 21 iulie 1969. Aveam 12 ani, iar părinții mei s-au gândit că nu trebuia să ratez un moment istoric. Pe ecranul alb–negru al televizorului l-am văzut pe Neil Armstrong coborând încet scara modulului lunar al navei Apolo 11 și spunând: „E un pas mic pentru om, un salt uriaș pentru omenire.”[212] Păstrez încă exemplarul meu din *Atlasului zborului lunar* al lui Patrick Moore, un volum comemorativ minunat ilustrat, publicat în același an. Volumul e plin cu fotografii color și desene (îl răsfoiesc chiar acum), dar pentru mine cele mai impresionante imagini sunt cele cu Pământul – „palida pată albastră”, după cum spunea Carl Sagan – privit din spațiu și de pe Lună. Astăzi, desigur, putem găsi ușor pe internet imagini cu „Pământul văzut din spațiu”.

Asemenea fotografii sunt dominate de albastrul oceanelor, care acoperă aproximativ două treimi din suprafața Pământului și contrastează cu albul norilor. Dar nu totul e albastru și alb. Dincolo de nori discernem o paletă de nuanțe maronii dezvăluind peisajele aride din nordul Africii și Orientul Mijlociu. Putem vedea de asemenea nuanțe de verde, mai ales în regiunea Amazonului din America de Sud. Albastrul, albul și maroniul sunt ceea ce obținem când alcătuim o planetă stâncoasă la distanța orbitală potrivită de o stea din Populația I și generația a treia. Verdele însă poate fi dat numai de viață.

Înverzirea lumii a trebuit să aștepte până ce viața s-a răspândit din ocean pe uscat. Conform estimărilor actuale, aceasta s-a întâmplat abia la 4,2 miliarde de ani de la formarea Pământului.[213] Și nu e greu de înțeles de ce. Chiar și după atâta timp, uscatul e un loc pustiu și inospitalier, unde clima se dezlănțuie – stâncile sunt erodate, ploile produc inundații, vânturile modelează dune dezolante. Nu există încă sol, fiindcă solul e produs de organisme.

Colonizarea acestei ecologii „pustii” pare perfect logică pentru viața aflată într-un mediu marin aglomerat. Numai că viața a evoluat până acum în oceane, iar toate sistemele ei biofizice și mecanismele biochimice sunt adaptate supraviețuirii în apă. Părăsirea apei supune viața la încercări dramatice.

Se pare că primii pași spre colonizarea uscatului au fost făcuți de algele verzi fotosintetizante de tipul celor pe care le găsim azi în apele dulci de mică adâncime. Selecția naturală impune ritmul. Viața depinde de apă, iar dezvoltarea unor structuri care ajută organismele să rețină apă și să găsească surse alternative e mult mai simplă decât încercarea de a dezvolta o formă de viață care să fie mai puțin dependentă de această substanță.

Organismele își dezvoltă deci un înveliș flexibil prevăzut cu găuri (numite stomate) care permit intrarea aerului și a dioxidului de carbon pe care îl conține, dar se pot închide pentru a împiedica pierderea apei. Își obțin energia necesară fixării carbonului și descompunerii moleculei de apă din lumina solară folosind blocuri fotosintetizante. Își întind rădăcinile în sol în căutare de apă și alți nutrienți. Își dezvoltă structuri pluricelulare care le conferă o anumită rezistență, permițându-le să crească muguri, apoi frunze. Aceste structuri sunt vasculare – prin ele circulă seva (compusă în principal din apă) în tot organismul. Seva e trasă în sus prin evaporarea apei din frunze, tensiunea superficială a apei și acțiunea capilarității – proces numit *transpirație.*

Sistemul reproductiv al unor specii de alge se bazează pe producerea și răspândirea sporilor. Acest mecanism e păstrat de primele plante terestre (și e folosit de multe specii actuale), dar sporii – bine izolați, pentru a rezista în afara apei – sunt acum dispersați de vânt. Primele specii de plante n-au supraviețuit până în prezent, însă ne putem face o idee despre ele studiind plante actuale precum hepatofitele, mușchii și ferigile. Microfosilele unor spori de plane similare hepatofitelor ne lasă să înțelegem că plantele începuseră să colonizeze uscatul pe la mijlocul Ordovicianului, cu vreo 460 de milioane de ani în urmă, iar 100 de milioane de ani mai târziu, spre sfârșitul Devonianului, erau bine statornicite. Chertul din Rhynie, în Aberdeenshire, Scoția, e o sursă bogată de fosile ale plantelor de uscat de la începutul Devonianului.

Către sfârşitul Devonianului, plantele proliferaseră, iar competiţia a încurajat selecţia structurilor tot mai înalte, pentru a capta suficientă lumină şi a–şi creşte şansele de răspândire la distanţă a sporilor, plantele concurente rămânând, la propriu, în umbră. *Wattieza*, o rudă a ferigii, şi-a dezvoltat o structură de rezistenţă şi de transport al apei compusă dintr-o reţea de celuloză şi lignină (lemn). Aceşti arbori preistorici aveau peste opt metri înălţime şi formau păduri care se întindeau pretutindeni în peisajul Devonianului mijlociu.

Toată această masă verde foloseşte fotosinteza oxigenică pentru descompunerea moleculei de apă, fixarea carbonului şi producerea oxigenului. Dacă e îngropat carbonul din materia organică moartă şi descompusă, nivelul oxigenului din atmosferă creşte şi mai mult, făcând posibile unele procese chimice de combustie care în ocean, evident, nu pot avea loc. Pădurile devin vulnerabile. Trăsnetele din timpul furtunilor electrice declanşează incendii forestiere, transformând plantele în cărbune. Asemenea depozite de cărbune sunt vizibile în straturile fosile de la începutul Silurianului.

Permiteţi–mi o observaţie. Arhiva fosilelor e tot ce avem, dar, aşa cum Darwin însuşi sublinia, nu trebuie să ne închipuim că ar fi „imparţială". Fosilizarea implică procese chimice complexe şi depinde nu doar de împrejurările accidentale în care organismele au fost îngropate, ci şi de condiţiile geologice şi atmosferice de la acel moment. Straturile fosilifere se găsesc de regulă într-unul sau două locuri de pe Pământ, unde rocile care le-au păstrat sunt accesibile paleontologilor. Este tot ce avem şi e imperfect.

Ascensiunea tetrapodelor

Plantele nu rămân multă vreme singurele stăpâne pe uscat. Cele mai vechi dovezi fosile privind animalele terestre sunt urmele lăsate de artropode, găsite în roci de la sfârşitul Ordovicianului şi începutul Silurianului. Printre aceste artropode se numără acarieni, miriapode, păianjeni şi scorpioni de apă. Planurile corpului lor sunt deja potrivite deplasării pe uscat, cu schelete externe care împiedică pierderea apei. Respiraţia aerobă necesită dezvoltarea *traheelor,* mici tuburi care – oarecum asemănător stomatelor plantelor – permit aerului să între, pentru ca oxigenul să fie absorbit şi transportat prin corp.

O scurtă vreme artropodele n-au rival. Uscatul verde oferă un minunat – și oarecum pustiu – ecosistem în care să prospere. Acarienii se târăsc pe materia organică în descompunere, hrănindu-se cu fungi și contribuind la formarea primelor soluri. Dar ecosistemul e ocupat rapid, iar competiția dintre pradă și prădător favorizează din nou dimensiunea și armura. Posibilitățile evolutive sunt limitate doar de mecanica fizică. La artropode, planul corpului cere picioare articulate, cu țesuturi moi și mușchi, ascunse în tuburi din carbonat de calciu. Cu cât un animal e mai mare, cu atât articulațiile sunt mai greoaie și îi este mai dificil să respire, dar evoluția își împinge limitele. *Slimonia* e un gen de scorpion de apă din Silurian care ajunge până la înspăimântătoarea lungime de doi metri și are plămâni primitivi sub forma unui țesut moale pliat, în partea inferioară a corpului. Își pândea prada în apropierea apelor dulci, așteptând să se năpustească asupra ei.

Deși ne-am îndreptat atenția spre uscat, evoluția continuă în mări și estuare. Cele mai vechi fosile de pești sunt cele de ostracodermi, ființe cu armură și fără mandibulă, care apar în Cambrian. Acestea sunt *vertebrate,* cu un schelet intern constând într-o coloană vertebrală. Ostracodermii au o platoșă osoasă care le acoperă capul, despre care se crede că are o origine genetică comună cu rândurile de dinți. Cele mai apropiate rude ale lor care au supraviețuit sunt chișcarii.

În Silurian apar placodermii, tot pești cu platoșă, dar dotați cu o mandibulă având probabil aceeași origine genetică cu primul arc branhial. Am fi tentați să credem a fost un avantaj în supraviețuire pentru că ajuta hrănirea, dar se pare că avantajul imediat a fost o respirație mai eficientă, mandibula împingând apa în branhii. Dezvoltarea mandibulei a dus la diversificarea peștilor care erau înzestrați cu ea în cursul Silurianului și Devonianului. Ajungem astfel la *sarcopterigieni,* pești cu înotătoare lobate, ai căror rude actuale sunt celacanții și peștii dipnoi.

Să ne îndreptăm acum atenția asupra unuia dintre genurile de sarcopterigieni de la sfârșitul Devonianului numit *Eusthenopteron.* La prima vedere, pare un pește banal, însă are unele trăsături anatomice interesante. La înotătoarele anterioare scheletul prezintă humerus, ulnă și radius, iar la înotătoarele posterioare – femur, tibie și fibulă. Acestea sunt structuri osoase pe care le asociem cu *tetrapodele* de

uscat, supraclasa care include toate animalele cu patru membre: amfibieni, reptile, păsări și mamifere.

O vreme s-a crezut că *Eusthenopteron* e arhetipul „peștelui care iese din apă", folosindu–și înotătoarele pentru a se târî pe uscat, și aflându-se la originea tuturor tetrapodelor terestre. Știm acum că, deși „tetrapodomorf", adică având unele trăsături anatomice comune cu tetrapodele, era totuși pește. Dovezile fosile adunate în ultimii 20 de ani ne–au permis să definim un spectru de morfologii, de la peștii semănând cu tetrapodele la tetrapodele semănând cu peștii.

Figura 82 rezumă cunoștințele noastre actuale. *Eusthenopteron* și *Panderichthys* sunt pești asemănători tetrapodelor, cu humerus, ulnă și radius la înotătoarele anterioare, iar *Panderichthys* are o structură și mai pronunțată de tetrapodă, cu degete scurte, nearticulate. *Tiktaalik* e și mai aproape de tetrapode, cu bot lung, ochi mari și o articulație care poate susține partea frontală a corpului. Aceste genuri sunt aproximativ contemporane, datând de la mijlocul până spre sfârșitul Devonianului.

Spre sfârșitul Devonianului apar tetrapodele asemănătoare peștilor, cum este *Acanthostega,* cu opt degete la membrele anterioare și cel puțin opt degete la cele posterioare. Deși pare mai curând amfibian, preferă pesemne să trăiască în apele puțin adânci (are coadă), de unde iese pentru a înhăța prada care se apropie prea mult de mal. *Ichtyostega* combină mai multe specializări evolutive, între care un aparat auditiv folosit sub apă și șapte degete la fiecare membru. *Tulerpeton* seamănă și mai mult cu un animal

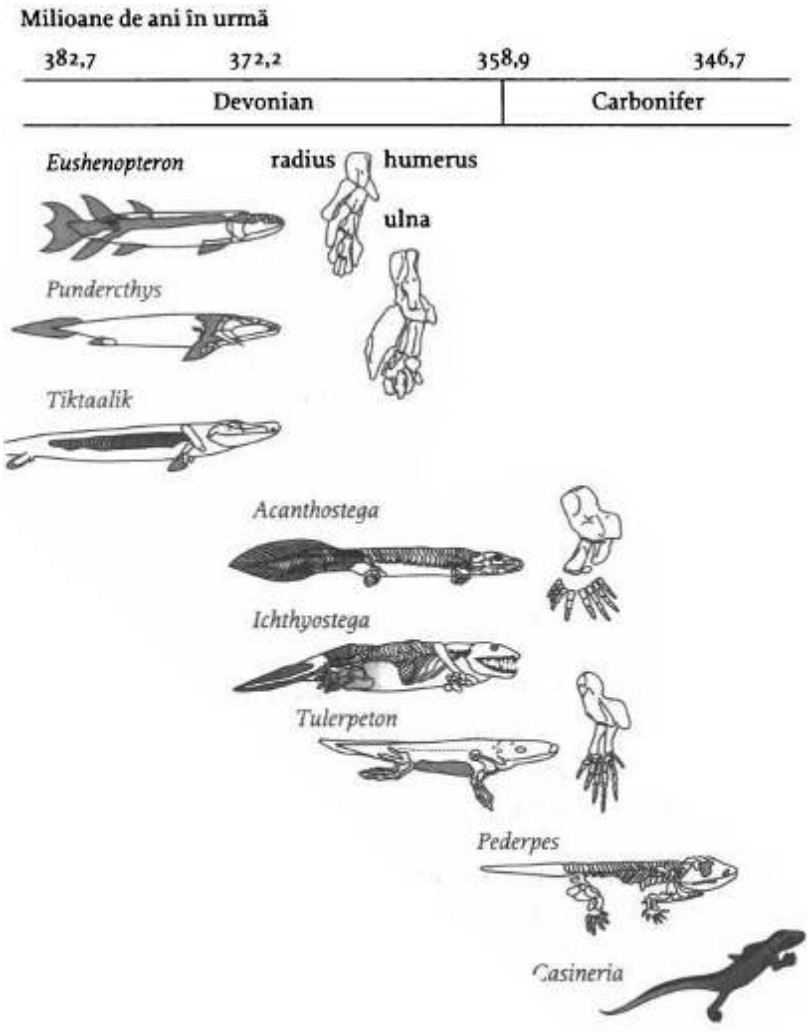


Figura 82. *Tranziția de la peștii cu înotătoare lobate la tetrapode a fost un proces complex, implicând evoluția înotătoarelor în membre cu degete și dezvoltarea unor structuri anatomice adaptate mersului. În arhiva fosilelor se găsesc o serie de animale, numite tetrapodomorfe, cu un spectru de morfologii care se întinde de la pești care seamănă cu tetrapodele la tetrapode care seamănă cu peștii. Casineria a fost un tetrapod în toată puterea cuvântului, datând de acum 340 de milioane de ani. Această figură a fost obținută prin suprapunerea figurilor 1, 5 și 12 din* Jennifer A. Clack, **Evolution: Education & Outreach**, *2 (2009), pp. 213–223.*

terestru, cu șase degete la membrele anterioare și probabil tot șase la cele posterioare. *Pederpes* este o ființă de la începutul Carboniferului, cu cinci degete la membrele posterioare, ceea ce e tipic tetrapodelor, și picioare orientate mai curând în față decât lateral. În fine, *Casineria*, descoperită în 1992 de un colecționar de fosile amator pe malul Golfului Cheese, lângă Edinburgh, e indiscutabil un tetrapod terestru din prima jumătate a Carboniferului, cu vreo 340 de milioane de ani în urmă. A dobândit toate adaptările evolutive necesare vieții pe uscat,

cum sunt plămânii (existenți deja la peștii dipnoi) și capacitatea de a depune ouă în afara apei. Are cinci degete cu gheare la fiecare membru. Deși aparține probabil unui grup neramificat, prezintă multe trăsături comune cu primele reptile.

Imaginea lui *Eusthenopteron* târându-se afară din apă și făcând primii pași pe uscat e adânc fixată în conștiința publicului și rămâne grăitoare, dar dovezi recente sugerează că tranziția de la pești la tetrapode n-a fost chiar așa simplă. Jenny Clark, profesoară la Universitatea Cambridge, e un expert internațional în această tranziție. În 2009, scria:[214]

Granița dintre „pești" și „tetrapode" devine tot mai dificil de trasat și ni se dezvăluie o poveste complexă, în care, de pildă, originea membrelor cu degete, originea mersului și a locuirii pe uscat și originea tetrapodelor în sens strict s-ar putea să fie trei lucruri diferite.

Pangeea, ultimul supercontinent

Lucrurile nu s-au desfășurat însă lin. Rocile apărute în urma activității vulcanice de la mijlocul Ordovicianului au captat pesemne dioxidul de carbon din atmosferă, iar pe când Gondwana se deplasa spre Polul Sud și nivelul mării scădea la sfârșitul Ordovicianului, a început o perioadă de glaciațiune. Aceste evenimente e posibil să fi contribuit la o extincție în masă (figura 81).

Nu cunoaștem cauzele episoadelor de extincție în masă de la sfârșitul Devonianului, dar ele au afectat puternic animalele marine din ape puțin adânci, în vreme ce alte specii au rămas relativ neafectate. S-ar putea ca mișcările continentale să fi jucat iarăși un rol, aducând la suprafață apele sărace în oxigen din adâncul oceanelor. Continentele Laurenția și Baltica se ciocniseră deja, formând Euramerica (numită uneori Laurasia) și împingând în sus partea nordică a Munților Apalași.

În Carbonifer însă viața e înfloritoare. Răspândirea vegetației pe uscat are ca efect îngroparea carbonului organic și pomparea oxigenului în atmosferă la o scară nemaiîntâlnită. Majoritatea depozitelor de cărbune atunci se formează, de unde numele perioadei. Îngroparea carbonului îl împiedică să se întoarcă în atmosferă ca dioxid de carbon, și avem motive să credem că aceasta permite nivelului de oxigen din atmosferă

să crească până la ameţitorul procentaj de 35%. Stratul atmosferic e acum mai gros.

Evoluţia îşi face de cap în privinţa dimensiunilor, împingând speciile la limitele permise de fiziologia lor. În Carbonifer, continentele sunt populate de giganţi. Licopodiofite uriaşe, arbori ajungând la 30 de metri înălţime şi un metru şi jumătate în diametru, domină mlaştinile Carboniferului (ca să vă faceţi o idee, gândiţi–vă la pădurile tropicale şi junglele din Indonezia actuală). Aceste mlaştini adăpostesc artropode gigante, insecte şi tetrapode. Am făcut deja cunoştinţă cu *Slimonia,* un scorpion de apă uriaş. Există şi miriapode lungi de doi metri. Pe sol mişună insectele, între care gândaci imenşi, dar ele ajung să populeze şi aerul. Ceea ce vor fi fost la început excrescenţe membranoase, care le permiteau insectelor să planeze de la o plantă la alta, au devenit acum aripi. Liniştea din aerul fetid deasupra mlaştinii e tulburată din când în când de bătăile din aripi ale insectelor uriaşe cum e *Meganeura,* sau „Libelula din Bolsover", cu anvergura aripilor de 65 de centimetri. Privim cu îngrijorare la *Cochleosaurus,* un amfibian primitiv, un prădător puternic care ajunge la o lungime de 3 metri şi se hrăneşte cu peşti şi mici tetrapode, pândindu–şi prada cam la fel cum fac crocodilii de azi. S-au propus multe explicaţii pentru apariţia acestui gigantism, dar abundenţa oxigenului pare să fie cauza principală.

O nouă etapă de formare a unui supercontinent se apropie de sfârşit. Gondwana, conţinând masele de uscat care vor deveni America de Sud, Africa, India, Australia şi Antarctica, se îndreaptă spre Euramerica, compusă din Laurenţia (America de Nord) şi Baltica (Europa). Când nord–vestul Africii atinge sud–estul Euramericii ia naştere partea de sud a Apalaşilor. Siberia se ciocneşte mai întâi de microcontinentul Kazahstania, făcând să apară Munţii Altai, iar apoi se îndreaptă spre Baltica, şi apar Uralii.

Formarea Pangeei – străbătută de ecuator şi întinzându-se spre poli (figura 83) – se încheie acum vreo 300 de milioane de ani, la sfârşitul Carboniferului. Existenţa ei a fost prezisă de geofizicianul german Alfred Wegener în cadrul teoriei derivei continentelor, propusă de el în 1912, şi a numit–o „Urkontinent" („continentul primordial"). Pangeea s-ar traduce din greacă prin „toate pământurile".

Ca întotdeauna, apar consecinţe. Formarea unui supercontinent face ca nivelul mării să scadă. Această unică masă de uscat influenţează clima, îndreptând–o spre glaciaţiune. Începe era glaciară Karoo, iar nivelul mării scade şi mai mult. Oxigenul din atmosferă se împuţinează.

Pădurile şi mlaştinile din Carbonifer intră în declin, iar când gheaţa se retrage, se formează deşerturi în centrul Pangeei. De asemenea, licopodiofitele sunt înlocuite de ferigile cu seminţe şi conifere primitive. Gândacii şi libelulele (dar mai mici) continuă să prospere, la fel şi amfibienii precum *Cochleosaurus.* Condiţiile aride favorizează în special reptilele, între care arhozaurii („şopârle dominante"), prădători semiacvatici asemănători crocodililor, robustul ierbivor *Pareiasaurus* şi *Lystrosaurus,* o reptilă asemănătoare mamiferelor,[215] cam de dimensiunea unui porc. În linii mari, viaţa continuă la fel ca în ultimele 200 de milioane de ani.

Marea Moarte

Extincţia în masă de la limita dintre Permian şi Triasic, în urmă cu 252 de milioane de ani, e numită

Figura 83. *Supercontinentrul Pangeea s-a format în urmă cu circa 300 de milioane de ani, spre sfârşitul Carboniferului. Era compus din Gondwana (America de Sud, Africa, India, Australia şi Antartica), Euramerica – conţinând Laurenţia (America de Nord) şi Baltica (Europa) – şi Siberia. Se întindea de la un pol la altul, cea mai mare parte aflându-se în emisfera sudică.*

uneori „Marea Moarte". Nu ştim exact ce a declanşat–o, dar există o destule variante. Principalii suspecţi sunt ciocnirea cu un asteroid, o serie prelungită de erupţii vulcanice, destabilizarea ecosistemelor în urma formării Pangeei şi scăderii nivelului mării, anoxia (nivel redus de oxigen), provocată de ridicarea la suprafaţă a apelor sărace în oxigen, şi eliberarea unor mari cantităţi de metan în atmosferă, conducând la o încălzire globală rapidă.

Un timp s-a crezut că ar putea fi mai multe cauze, animalele marine şi terestre din Permian căzând victime unei scăderi treptate a capacităţii de supravieţuire, urmată de două sau trei „ghinioane" geologice – ceea ce paleobiologul american Douglas Erwin numea ipoteza *Crimei din Orient Express,*[216] idee care acum nu mai e împărtăşită de paleontologi. Un studiu recent (din 2014) arată că Marea Moarte a durat doar 60.000

de ani, plus sau minus 48.000 de ani,[217] fapt care restrânge lista suspecţilor. O moarte rapidă, ca o execuţie, presupune un eveniment catastrofal brusc sau un şir scurt de evenimente, cum ar fi ciocnirea cu un asteroid sau o activitate vulcanică la scară mare.

Sunt greu de găsit dovezile ale ciocnirii cu un asteroid la acea epocă. Suprafaţa plină de cratere a Lunii ne aduce azi mărturia Ultimului Mare Bombardament pentru că acolo nu există climă. Craterele nu sunt erodate sau eliminate de mişcările plăcilor care pe Pământ de regulă „şterg tabla" la fiecare 200 de milioane de ani. Există totuşi unele indicii legate de urmele substanţelor chimice şi de mici variaţii ale gravitaţiei locale în zonele unde se presupune că a avut loc impactul, iar acestea au fost folosite pentru a susţine ipoteza ciocnirii cu un asteroid. Dovezile nu sunt însă tocmai convingătoare, aşa încât juriul nu s-a pronunţat deocamdată.

Dovezile erupţiilor vulcanice sunt mult mai clare. Trappele Siberiene sunt o zonă întinsă de rocă vulcanică în trepte, bazalt format în urma celui mai mare şir de erupţii vulcanice în 600 de milioane de ani de istorie a Pământului, şi care a durat un milion de ani (ceea ce, în termeni geologici, înseamnă „brusc"). A avut loc între 252 şi 251 de milioane de ani în urmă, iar asta nu poate fi o coincidenţă.

Vă gândiţi probabil că v–aţi putea imagina acest eveniment, fiindcă aţi mai văzut erupţii vulcanice la televizor sau în filme. Vă asigur că e imposibil. Volcano Explosivity Index (VEI) e echivalentul vulcanic al scării Richter pentru cutremure şi corelează înălţimea norului de gaz, fum şi cenuşă cu volumul de material ejectat în timpul erupţiei. Erupţia Muntelui Sf. Elena din 1980 a produs un nor de peste 25 de kilometri înălţime şi a ejectat un kilometru cub de material în atmosferă, ceea ce pe scara VEI înseamnă o erupţie de gradul 5.[218] În urmă cu 70.000 de ani, în zona Lacului Toba din Indonezia, se crede că a avut loc o erupţie vulcanică în care au fost ejectaţi 100 de kilometri cubi de material, ajungându-se la gradul cel mai înalt (8) pe scala VEI.

Erupţiile care au creat Trappele Siberiene se crede că au ejectat 4 *milioane* de kilometri cubi de material, acoperind o suprafaţă cât cea a Statelor Unite până la înălţimi între 100 şi 6000 km. Desigur, nu s-au

petrecut dintr-odată, dar estimările arată că erupții masive au avut loc aproximativ o dată la 50 de ani, vreme de un milion de ani.

Sub un asemenea asalt, atmosfera se umple cu pulbere și fum, ecranând radiația Soarelui și împiedicând orice fotosinteză. Nivelul dioxidului de carbon atmosferic crește spectaculos, îndeajuns pentru a ridica temperaturile globale cu 5°C și, poate, declanșând eliberarea metanului înghețat din rezervoarele marine, accentuându-se astfel încălzirea. Gazele vulcanice sulfuroase revin din atmosferă sub forma ploii acide mortale. Mările puțin adânci devin mai acide și anoxice, pentru că oxigenul e mai puțin solubil în apa caldă. Ai zice că lumea s-a întors în Hadean, că e iadul pe Pământ.[219] Uscatul e jupuit, apa și aerul întorc spatele vieții.

Nu e clar felul în care o perioadă prelungită de activitate vulcanică provoacă o extincție bruscă, dar ne putem închipui că ecosistemele sunt îndelung solicitate, ajungând în punctul critic dincolo de care puține specii supraviețuiesc. Pesemne a început de la baza lanțului trofic, cu prima piesă de domino care se prăbușește. În orice caz, consecințele sunt devastatoare. Pădurile și mlaștinile dispar, iar 90–95% din genurile marine pier, între care și rezistenții trilobiți, care au supraviețuit 270 de milioane de ani. Dispar și multe animale terestre – e singura extincție în masă a insectelor. În *Life: An Unauthorised Biography*, publicată în 1997, Fortey scria:[220]

Dacă un oraș mic ar fi afectat în aceeași măsură, ne-am putea imagina că ne plimbăm apoi pe străzile pustii, fără să dăm peste vreo figură cunoscută printre puținii supraviețuitori de pe trotuare. Nimeni n-ar mai păzi magazinele. Am mai auzi poate în noapte plânsetul unui copil rătăcit. Dar neantul ar stăpâni aproape pretutindeni.

Epoca dinozaurilor

Regenerarea e îndelungată. Trec vreo zece milioane de ani pentru ca viața să–și revină după extincția din Permian–Triasic. Tetrapodele terestre au dispărut aproape complet. *Lystrosaurus,* ierbivorul de dimensiunea unui porc pe care l-am întâlnit la sfârșitul Permianului, e printre puținii supraviețuitori. Nu–i clar de ce, fiindcă nu avea trăsături prin care să fie în mod special potrivit ecologiei post–extincție de la

începutul Triasicului. Dimensiunea mică, robusteţea, caninii ca nişte fildeşi şi ciocul cornos se poate să-l fi ajutat să se adapteze unei diete noi, sărăcăcioase, compusă din tufişuri şi ierburi. Însă alte tetrapode, nu mai puţin apte, au dispărut. Poate că *Lystrosaurus* s-a salvat săpându–şi vizuine în pământ. Sau poate a avut noroc. *Lystrosaurus* este unul dintre acele „organisme pionier", forme de viaţă care supravieţuiesc dezastrului şi profită rapid de golul creat, diversificându-se şi răspândindu-se în Pangeea. Fosile ale diferitelor specii de *Lystrosaurus* au fost descoperite în Africa de Sud, India şi Antarctica, ceea ce dovedeşte că acestea au fost unite odinioară într-un mare continent.

Una sau mai multe specii de *Archosauriformes* au reuşit de asemenea să supravieţuiască, evoluând la începutul Triasicului către arhozauri, strămoşii comuni ai păsărilor, crocodililor şi dinozaurilor nonaviari. Arhozaurii sunt sauropside („feţe de reptilă"). *Lystrosaurus*-ul asemănător mamiferelor e o terapsidă („faţă de fiară"), făcând parte din grupul sinapsidelor. În lupta evolutivă pentru dominaţie care urmează, sauropsidele sunt favorizate. Peisajul arid care domină din nou Pangeea avantajează reptilele cu sânge rece, capabile să conserve apa. Triasicul mijlociu e marcat de revigorarea pădurilor şi începutul epocii dinozaurilor.

Dintotdeauna am fost fascinaţi de monştri. Ei apar în vechile mituri (gândiţi–vă la *Hidra,* şarpele cu mai multe capete, la *Kraken* şi la dragonii medievali), dar şi în cele moderne (*Smaug* şi *Balrog* din cărţile lui J.R.R. Tolkien). Oase fosile de dinozauri au fost descoperite şi identificate ca atare pe la 1820, iar numele („reptile înspăimântătoare") le-a fost dat în 1841 de paleontologul englez Richard Owen, care avea să devină primul director al Muzeului de Istorie Naturală din Londra, înfiinţat în 1881.

Dinozaurii nu sunt fiinţe mitologice născocite de o imaginaţie bogată, ci au existat în realitate. Ei s-au fixat în conştiinţa publicului încă de când au fost descoperite fosilele lor şi au fost aduşi la viaţă prin ilustraţii realiste şi, recent, prin filme cum sunt cele din seria *Jurassic Park.* Am ajuns să cunoaştem multe dintre denumirile latineşti ale speciilor şi genurilor lor. M–am gândit să prezint evoluţia dinozaurilor în Triasic, Jurasic şi Cretacic cu ajutorul celor mai cunoscute genuri (figura 84).

Dinozaurii sunt clasificaţi în funcţie de oasele bazinului. Saurischienii au „bazin de reptilă”, ornitischienii au „bazin de pasăre”. Când a fost introdusă această schemă, categoria din urmă nu era menită să implice vreo relaţie anatomică cu păsările şi, la prima vedere, pare ciudat să vedem păsările catalogate drept saurischieni cu „bazin de reptilă”. De fapt, oasele bazinului lor au evoluat în timp, iar structura de tip pasăre a fost reinventată.

Primii dinozaurii care evoluează din strămoşii lor arhozauri sunt sauropodele, care apar în arhiva fosilelor spre sfârşitul Triasicului. Acestea sunt bine cunoscutele ierbivore cu gâtul lung, veridic prezentate în *Jurassic Parc* cum se deplasează în turme şi pasc vârfurile arborilor. Printre ele se numără *Apatosaurus* (cunoscut pe vremuri drept *Brontosaurus),* o sauropodă de la sfârşitul Jurasicului atingând 20 de metri în lungime şi cântărind circa 16 tone, şi *Diplodocus*,

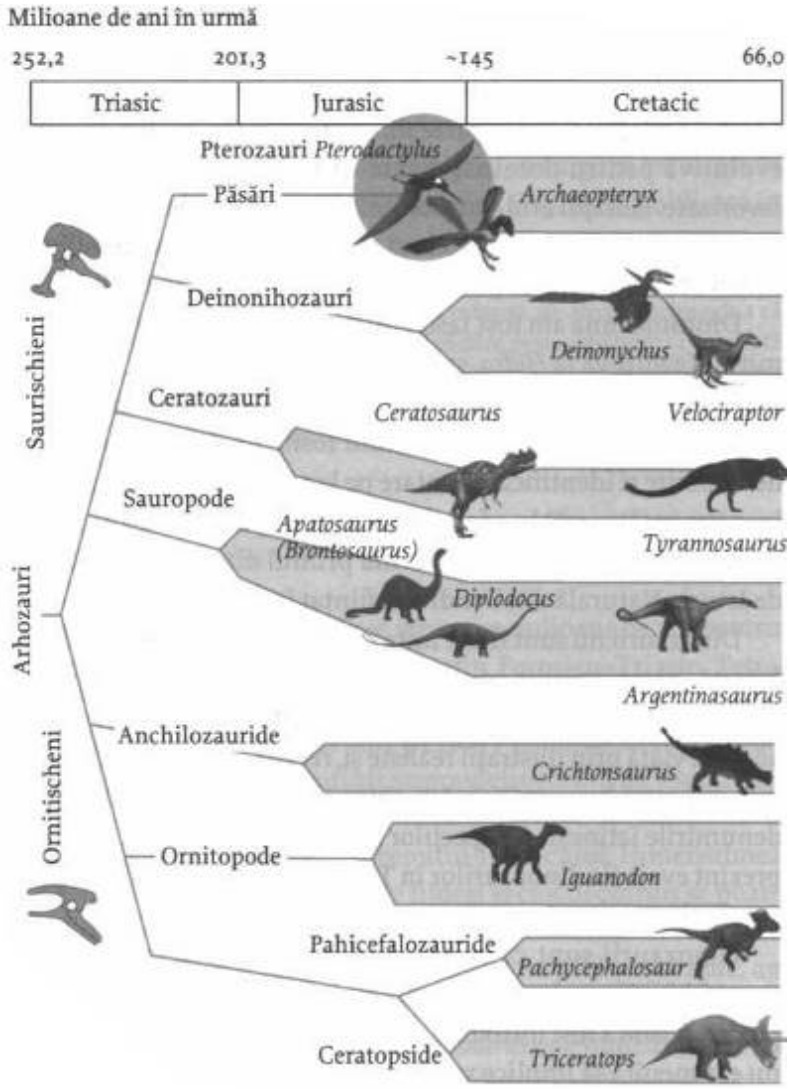


Figura 84. *O descriere aproximativă a evoluției dinozaurilor, începând cu strămoșul lor comun de la începutul Triasicului până la sfârșitul Cretacicului. În funcție de oasele bazinului, dinozaurii se împart în saurischieni („bazin de reptilă") și ornitischieni („bazin de pasăre"). Deși ordinele dinozaurilor s-ar putea să nu vă fie familiare, fiecare e ilustrat printr-un gen mai cunoscut. Excepție face* **Pterodactylus**, *care nu e considerat dinozaur (și e marcat cu un cerc gri), dar l-am inclus pentru a ilustra evoluția zborului.*

cântărind cam la fel, dar al cărui gât face ca lungimea totală a corpului să ajungă la 35 de metri.

Spre sfârșitul Cretacicului, diferite genuri de sauropode concurează pentru titlul de „cel mai mare animal de pe Pământ". Ele sunt pe drept cuvânt numite *titanozauri.* Cel mai mare exemplar este *Patagonitan mayorum*, descoperit în Argentina în mai 2014. Cu o lungime de 37 de

metri și cântărind 69 de tone, aproximativ greutatea unei case medii, *Patagonitan* este cel mai mare dintre animalele terestre cunoscute.

Ceratozaurii („reptile cu corn") apar cam în același timp sau puțin mai târziu. Ceratozaurul arhetipal este, desigur, *Ceratosaurus*, de la sfârșitul Jurasicului, contemporan cu *Apatosaurus* și *Diplodocus.* E un prădător feroce, cu fălci mari și dinți ascuțiți, biped, cu membre anterioare scurte, dar puternice, lung de circa șase metri și cântărind între o jumătate de tonă și o tonă.

La prima vedere, *Ceratosaurus* pare familiar. E posibil să vă aducă aminte de dinozaurul favorit al tuturor, *Tyrannosaurus rex* („reptila tiran"), care apare spre sfârșitul Cretacicului. L-am inclus în figura 84, deși *T. Rex* nu e ceratozaur, ci celuozaur, un subgrup taxonomic care a suferit multe revizuiri de-a lungul anilor. Lung de 12 metri, cântărind aproape șapte tone și având cea mai puternică mușcătură dintre toate animalele terestre care au trăit vreodată, *T. Rex* este indiscutabil un tiran. Cu riscul de a–i strica imaginea, trebuie totuși să spun că e posibil să fi avut pene. Nu e atât de rapid pe cât ne–a fost prezentat în film și n-ar fi în stare să urmărească un jeep, dar dacă realizatorii lui *Jurassic Park* ar fi fost riguroși, n-am fi avut parte de scena memorabilă în care Robert Muldoon (jucat de Bob Peck) privește înspăimântat un *T. Rex* în oglinda retrovizoare, unde scrie: OBIECTELE DIN OGLINDĂ SUNT MAI APROPIATE DECÂT PAR.

La scurt timp după ceratozauri, către începutul Jurasicului, apar anchilozauridele, acei dinozauri blindați cu platoșă și cu o ghioagă osoasă la capătul cozii. Un anchilozaur descoperit în 2002 de paleontologii chinezi în roci din Cretacicul târziu a fost numit după Michael Crichton, autorul cărților *Jurassic Park* și *The Lost World.* Ornitopodele, cum e *Iguanodon*, au un cioc cornos, dar nu și armură, și sunt printre ierbivorele de succes. Pahicefalozauridele („reptile cu capul gros") au cranii mari, boltite, folosite, se pare, în dueluri. Ceratopsidele, între care *Triceratops,* posedă ornamente sofisticate și coame, probabil pentru a lupta cu membrii aceleiași specii și a se apăra de prădători mai mari.

Ajungem în fine la păsări. Strict vorbind, pterozaurii nu sunt considerați păsări (și nici măcar dinozauri) și nu e dar cum descind din arhozauri,

însă cred că n-ar trebui excluși din povestea noastră. I-am așezat alături de păsări în figura 84 nu pentru că ar fi înrudiți (probabil că păsările sunt mai strâns înrudite cu crocodilii decât cu pterozaurii), ci pentru că pot zbura. Genul *Pterodactylus* („deget înaripat") aparține unui subordin al pterozaurilor apărut în arhiva fosilelor în Jurasicul târziu. E o reptilă carnivoră zburătoare, cu un cioc lung și aripi dintr-o membrană de piele și mușchi întinsă de la un deget alungit până la membrele posterioare. Anvergura aripilor e de circa un metru: semăna mai curând cu un liliac decât cu păsările pe care le cunoaștem azi. Speciile ulterioare de pterozaurii ajung la dimensiuni și mai mari. *Quetzalcoatlus* apare spre sfârșitul Cretacicului și are o anvergură a aripilor de peste zece metri.

Rămășițe fosile de *Archaeopteryx* („pasăre veche") au fost găsite în 1861 și reprezintă o legătură crucială între dinozaurii cu pene și păsările moderne. Primele fosile descoperite au fost folosite de Darwin ca argument în favoarea evoluției prin selecție naturală în *Originea speciilor.* E cam de mărimea unui corb, dar seamănă mai curând cu un dinozaur decât cu o pasăre modernă, având multe trăsături în comun cu deinonihozaurii, pe care îi vom întâlni în curând. Deși penele lui au ajuns să semene cu penele păsărilor, posedă dinți mici și o coadă osoasă.

Printre realizările cărților și filmelor *Jurassic Park* a fost și popularizarea lui *Velociraptor,* un gen de dinozaur până atunci puțin cunoscut. În filme, apărea ca o reptilă bipedă vicleană și rea, care vâna în haită. Personajul Alan Grant, jucat de Sam Neill, credea că *Velociraptor* seamănă mult cu păsările actuale,[221] iar descoperirile ulterioare confirmă această idee.

Velociraptor are pene și e mult mai mic decât apare în filme, având lungimea de doi metri și înălțimea de jumătate de metru. Imaginea răpitorului tipic e mai apropiată de cea a lui *Deinonychus* care, pe vremea când Crichton își scria prima carte, era considerat o specie a genului *Velociraptor. Deinonychus* („gheară înspăimântătoare") e mai mare, cu o lungime de peste trei metri și o înălțime de aproape un metru. Are și el pene. Nu știm încă dacă Deinonychus vâna în haită sau se arunca singur asupra prăzii, ca un vultur.

Acest bestiar nu include genurile care n-au supraviețuit până la sfârșitul Cretacicului, cum sunt stegozaurii. Nu încape îndoială că dinozaurii sunt excelent adaptați. Ei supraviețuiesc unui nou eveniment de extincție în masă, la sfârșitul Triasicului (asociat iarăși cu o activitate vulcanică intensă). Ei supraviețuiesc fragmentării Pangeei, care începe în Jurasic când Laurasia (Laurenția și Eurasia) se rupe de Gondwana. În prima parte a Cretacicului, Gondwana se fragmentează, formându-se continentele din emisfera sudică pe care le vedem azi.

Și mai e ceva. Ultimii dinozaurii cutreieră primele *grădini* ale Pământului. Plantele cu flori (numite *angiosperme*) radiază în Cretacicul mijlociu, evoluția lor fiind determinată de simbiozele stabilite cu o mare diversitate de insecte și animale care populează acum uscatul și aerul. Plantele devin dependente de ființele care le transportă și le răspândesc polenul conținând precursorii celulelor de spermă. Unele plante dezvoltă trucuri ca să atragă o anumită specie de insecte.

Pentru a alege un exemplu modern dintre multe altele, *Ophrys* e un gen de orhidee care produc flori de forma unei albine femelă. Floarea emite un feromon sexual care semnalează că e gata de împerechere. Masculii amăgiți copulează cu floarea și fie culeg polenul, fie o polenizează. Se pare că o albină poate fi păcălită doar o dată, dar e suficient pentru a asigura supraviețuirea plantei. În lumea clorofilei își fac apariția culorile și mirosurile.

Craterul de la Chicxulub

Când eram tânăr, dinozaurii erau prezentați ca niște animale greoaie, încete la minte, al căror corp depășea cu mult capacitățile creierului. Păreau condamnați la extincție; un experiment evolutiv eșuat, chiar dacă prelungit. Și azi cuvântul „dinozaur" desemnează un eșec al imaginației, incapacitatea sau refuzul de a evolua odată cu timpurile care se schimbă. Reputația dinozaurilor a fost însă în mare măsură reabilitată prin eforturile unor paleontologi americani cum sunt Jack Homer și Robert Bakker.[222]

În ciuda opiniei predominante, Bakker a susținut că dinozaurii erau ființe cu sânge cald, mult mai activi decât reptilele cu sânge rece.

Păsările, deinonihozaurii şi ceratozaurii intră în categoria *teropodelor,* dinozauri asemănători mamiferelor.[223] Aveau un nivel mai înalt de socializare, trăiau în turme şi îşi făceau cuiburi într-un mod care ne duce cu gândul la mamiferele şi păsările actuale.

Sinapsidele, strămoşii mamiferelor, evoluaseră în paralel cu sauropsidele din Carboniferul mijlociu, dar spre sfârşitul Cretacicului, mamiferele fuseseră împinse la marginile ecosistemelor lor. Au luat forma unor insectivore nocturne mici (cum e *Megazostrodori),* asemănătoare cu chiţcanul arboricol, şobolanul, tatuul şi veveriţa zburătoare. Pe de altă parte, *Repenomamus* era un mamifer de dimensiunea unui viezure care se hrănea probabil cu pui de dinozauri. Nu încape îndoială că dinozaurii aveau toate atuurile şi n-avem niciun motiv să bănuim că nu ar fi continuat să domine lumea.

Majoritatea cititorilor ştiu deja cum se încheie capitolul. Dovezile ciocnirii cu un asteroid în urmă cu 66 milioane de ani sunt acum indubitabile. Aceasta coincide cu dispariţia dinozaurilor la sfârşitul Cretacicului şi ascensiunea mamiferelor din Paleogen. Cei blânzi vor moşteni într-adevăr Pământul. Ideea că ciocnirea cu un asteroid a fost răspunzătoare de extincţia în masă de la limita dintre Cretacic şi Paleogen (notată uneori cu „K–Pg")[224] a fost propusă în 1980 de fizicianul american Luis Alvarez şi de fiul acestuia, Walter, geolog. Limita K–Pg este marcată de un strat subţire de argilă care separă rocile din Cretacic de cele din Paleogen. Cei doi Alvarez au ales să folosească un izotop al iridiului, ^{77}Ir, pentru a determina viteza cu care s-a depus acest strat. În autobiografia sa din 1987, Luis Alvarez scrie:[225]

Frank [Asaro] şi Helen [Michel] au analizat eşantionul nostru. Am avut surpriza să aflăm că în stratul de argilă era concentrat de trei sute de ori mai mult iridiu decât în straturile de calcar de deasupra şi de dedesubt.

Asteroizii şi meteoriţii condritici conţin mult mai mult iridiu decât scoarţa terestră. După ce au calculat efectul ciocnirii cu un asteroid, având diametrul de 10 km, asupra climei Pământului, au ajuns la concluzia că existau suficiente dovezi pentru a-l condamna pe principalul suspect Ideea rămânea însă controversată, era nevoie de mai multe dovezi. Ciocnirea cu un asemenea asteroid trebuia să fi lăsat

în urmă un crater. De fapt, un crater de impact fusese descoperit în 1978 lângă orașul Chicxulub din Peninsula Yucatan de către un grup de geofizicieni care lucrau pentru Pemex, compania petrolieră de stat din Mexic (figura 85). Descoperirea lor a fost larg mediatizată abia la începutul anilor 1990.

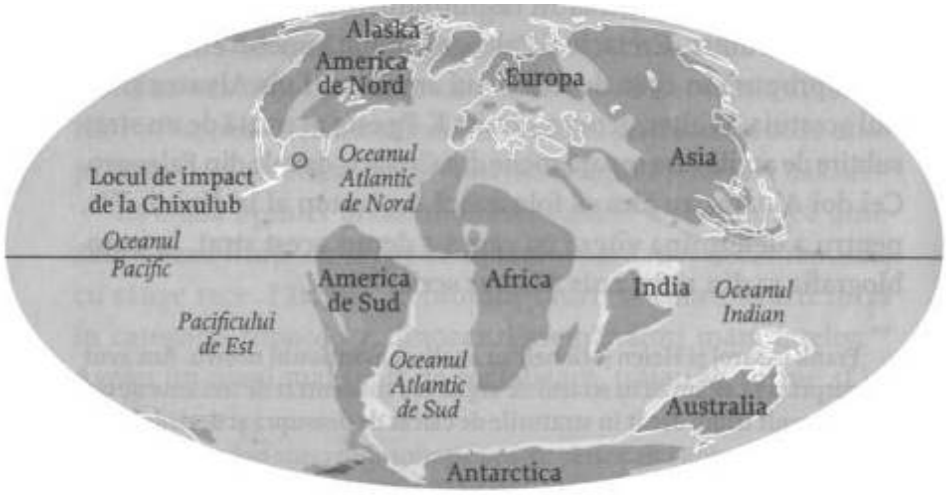


Figura 85. *Locul impactului de la Chicxulub, așa cum apărea la sfârșitul Cretacicului. Laurenția s-a separat de Eurasia, cu formarea Oceanului Atlantic de Nord. Gondwana s-a fragmentat, America de Sud îndepărtându-se de Africa pentru a forma Oceanul Atlantic de Sud. India se îndreaptă spre nord pentru a se ciocni cu sudul Asiei. Australia încă e legată de Antarctica, dar curând se va separa și se va îndrepta spre nord.*

Deși nu avem dovezi clare, s-ar putea ca activitatea vulcanică să fi jucat și ea un rol, amplificând efectele impactului. Trappele Deccan, o formațiune bazaltică din Podișul Deccan, în India, se crede că sunt rezultatul unei serii de erupții vulcanice care a început în urmă cu 68 de milioane de ani și a durat două milioane de ani.

Putem ghici consecințele. Praf, întuneric, dispariția organismelor fotosintetizante (inclusiv a acelor minunate flori), prăbușirea lanțurilor trofice, ploi acide, nivelul ridicat de oxigen din atmosferă întreținând incendii devastatoare. Moartea își întinde iarăși umbra deasupra Pământului.

11
Amprenta umană

Originea omenirii

Există câteva trăsături care deosebesc mamiferele de alte tipuri de animale. Au sânge cald, ceea ce înseamnă că îşi pot menţine constantă temperatura corpului ca rezultat al unui ritm metabolic crescut. Spre deosebire de reptile, mamiferele nu trebuie să aştepte căldura Soarelui pentru a le creşte temperatura corpului înainte să pornească în căutarea micului dejun. Mamiferele trebuie totuşi să–şi regleze temperatura corpului, iar rolul părului sau blanei (altă trăsătură definitorie a mamiferelor) este de a-l izola când temperatura externă scade. Glandele din piele îl răcesc (prin transpiraţie) când temperatura creşte. Reptilele nu tremură de frig, nici nu transpiră.

Primele mamifere sunt *amniote* – depun ouă conţinând un săculeţ cu apă, care permite însă embrionului să respire –, la fel ca toate animalele care descind din primele tetrapode terestre. Câteva mamifere moderne, ca ornitorincul şi echidna, au păstrat această strategie reproductivă. Dar mamiferele adaptate să nască pui vii apar spre sfârşitul Cretacicului. Acestea includ marsupialele, care îşi poartă un timp puii relativ subdezvoltaţi într-o pungă, şi mamiferele placentare, care, după o lungă gestaţie în uter, dau naştere unor pui complet dezvoltaţi.

Desigur, o trăsătură definitorie a mamiferelor (cea care le dă numele) e faptul că femelele îşi hrănesc puii nou–născuţi prin *supt.* Evoluţia în timp şi natura dezvoltării glandelor mamare rămâne subiect de dezbatere ştiinţifică, iar una dintre teorii sugerează că ele au fost adaptate din glande sudoripare.

Extincţia în masă de la limita K–Pg a fost ucigătoare, dar nu la fel de devastatoare ca Marea Moarte. Majoritatea speciilor arhaice de păsări dispar, însă unele supravieţuiesc, iar fosilele câtorva specii de păsări s-au găsit în straturi de roci atât anterioare, cât şi ulterioare stratului-limită. Înspăimântătorii pterozauri au dispărut de pe cer. Circa jumătate din speciile de crocodili s-au pierdut. Impactul asupra mamiferelor e mai curând local. Deşi există destule pierderi, majoritatea speciilor de mamifere supravieţuiesc, însă puţine marsupiale mai populează

America de Nord și trebuie să privim fauna actuală a Australiei pentru a afla nu doar că au supraviețuit, ci și că au continuat să prospere acolo. A contat pesemne distanța față de locul impactului. Pentru a supraviețui unei extincții în masă, se pare că o cerință importantă e să fii mic. Animalele mici au nevoie de mai puțină hrană, se reproduc mai repede și au mai mulți urmași, ceea ce încurajează diversitatea genetică, deci adaptabilitatea. E bine să nu depinzi de un anumit tip de hrană, în special de una care riscă să dispară, iar atunci când lucrurile se înrăutățesc, să te poți muta în căutarea unor condiții mai bune. Animalele care își sapă vizuini și hibernează sunt de asemenea avantajate.

Intrăm în Paleogen. Praful se așterne, Soarele strălucește din nou, fotosinteza se reia. Până acum, capitolele din povestea vieții pe Pământ acopereau sute de milioane sau milioane de ani, dar apropiindu–ne de *Homo sapiens*, vom avea de-a face cu intervale mai scurte (figura 86). Fiecare perioadă geologică e împărțită în *epoci*, iar Paleogenul cuprinde epocile Paleocen, între 66 și 56 de milioane de ani în urmă, Eocen, între 56 și 34 de milioane de ani în urmă, și Oligocen, între 34 și 23 de milioane de ani în urmă.

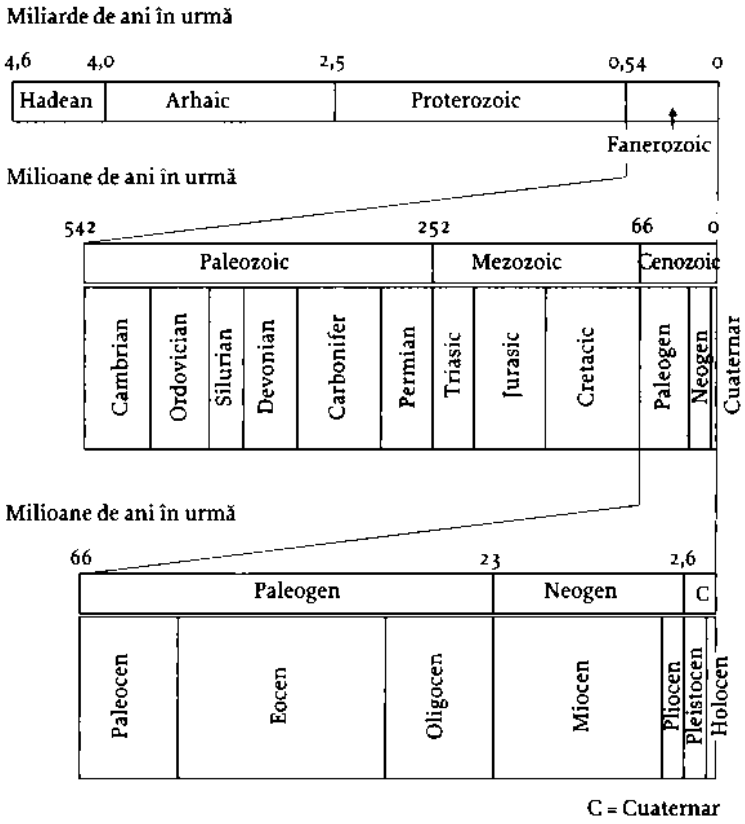


Figura 86. *Pe măsură ce ne apropiem de apariția omului, intervalele timpului geologic se comprimă. Eonul Fanerozoic începe cu 542 de milioane de ani în urmă și se continuă până în prezent. Acesta se împarte în trei ere: Paleozoic, Mezozoic și Cenozoic. Până acum am urmărit evenimente raportate la perioadele succesive ale acestor ere: de la Cambrian la Paleogen, Neogen și Cuaternar. Vom împărți acum fiecare dintre aceste perioade ale Cenozoicului în epoci – Paleogenul în Paleocen, Eocen și Oligocen; Neogenul în Miocen și Pliocen; Cuaternarul în Pleistocen și Holocen.*

Paleocenul e la început rece și uscat, dar clima se încălzește treptat în următoarele zece milioane de ani, pe măsură ce nivelul dioxidului de carbon din atmosferă crește din nou. La ecuator clima devine tropicală, iar uscatul e fierbinte și arid în ambele emisfere. La poli e răcoare. Pădurile și grădinile bogate în culori renasc, în Groenlanda cresc palmieri. Încălzirea continuă, culminând cu Maximumul Termic din Paleocen–Eocen, marcat de o nouă creștere a raportului $^{13}C/^{12}C$ în rocile marine și terestre, după care temperatura scade. Taxonii care au supraviețuit s-au mutat pentru a ocupa noua ecologie permisivă a Paleocenului, iar păsările și mamiferele cunosc acum importante radiații adaptive.

Cintezele lui Darwin și radiațiile mamiferelor

În timpul călătoriei cu vasul Beagle, Darwin a remarcat mici adaptări evolutive la cintezele care populează insulele vulcanice ale Arhipelagului Galapagos. La întoarcere, în 1837, și-a prezentat descoperirile în fața Societății de Geologie din Londra, iar experții au identificat 12 specii de cinteze, un număr uimitor, dată fiind relativa apropiere a insulelor (astăzi știm că există 15 specii). Darwin s-a gândit că aceste cinteze evoluaseră dintr-un strămoș comun din America de Sud, adaptările lor (în special forma ciocului) reflectând mici diferențe între ecosistemele unde au ajuns să trăiască. Cintezele evoluaseră în relație cu mediul lor local, forma ciocului fiind determinată de natura hranei principale – de la ciocuri lungi și subțiri, pentru a scurma în pământ după viermi, la ciocuri mici și butucănoase, potrivite pentru o dietă bazată pe semințe. Morala este că izolarea geografică stimulează *diversificarea* speciilor.[226]

Vedem acum același lucru la scara mare a radiațiilor evolutive ale mamiferelor în Paleocen și Eocen. Ultimul supercontinent se fragmentează, iar continentele se îndreaptă spre configurația lor actuală. Dar America de Sud n-a apucat să formeze o punte terestră cu America de Nord, Africa e tot separată de Eurasia prin Oceanul Tethys, India nu s-a ciocnit încă de Asia, Australia se rupe de Antarctica și pornește spre nord. Povestea evoluției mamiferelor e indisolubil legată de povestea mișcării continentelor.

Avem puține urme fosile ale mamiferelor din Paleocen, probabil fiindcă sunt încă mici, dar în epocile ulterioare numărul lor crește. Straturile fosile din Eocen descoperite la Riversleigh, Queensland, ne spun că faima marsupială din Australia de azi e o palidă rămășiță a unei extraordinare diversități de străvechi koala, bursuci marsupiali, vombatide, falangeriforme, canguri, dipodomi, lei marsupiali și tigri tasmanieni. Multe fosile nu pot fi clasificate și au fost incluse într-un ordin dispărut, botezat *Thingodonta Yalkaparidon,* unul dintre reprezentanții lui, pare un fel de cârtiță ciudată sau un primitiv mamifer–ciocănitoare.[227]

Nu–mi propun să urmăresc mai departe istoria evolutivă a marsupialelor, dar trebuie să pomenesc ierbivorul *Diprotodon.* Apare în

arhiva fosilelor cu 1,6 milioane de ani în urmă și se crede că a dispărut acum vreo 48.000 de ani, curând după sosirea pe continent a lui *Homo sapiens.* Este cel mai mare marsupial cunoscut, atingând mărimea unui hipopotam. Se bănuiește că a fost reprezentat în arta rupestră aborigenă și a fost vânat până la extincție.

Cariera Messel, la vreo 35 de kilometri de Frankfurt, e o bogată sursă de fosile, iar în 1995 a fost inclusă în Patrimoniul Mondial UNESCO. În Eocen acolo a fost un lac. Fosilele sunt excepțional conservate, prezentând blană, pene și urme de piele. Fauna Europei este complet diferită de cea australiană, dominată de marsupiale. Există unele marsupiale primitive, dar majoritatea sunt mamifere placentare: lilieci, urși furnicari, rozătoare, arici, mici cai primitivi *(Eurohippus),* cenodonte (înrudite cu carnivorele), mamifere prădătoare semănând cu felinele, despre care se crede că sunt strămoșii carnivorelor, și primate mici. Mamiferele însă nu sunt singure, ele își împart mediul cu păsări, reptile (șerpi, șopârle și diferite tipuri de crocodili), insecte (gândaci și furnici uriașe) și pești.

Mamiferele din America de Sud sunt nu mai puțin remarcabile. Printre ele se numără marsupiale primitive și mamifere placentare cum ar fi tatuul, furnicarul sau leneșul și un fel de animale cu copite, strămoșii cailor, girafelor, cămilelor, căprioarelor, vacilor și hipopotamilor. În Miocen apare gliptodontul, înrudit cu tatuul, dar lung de trei metri. *Megatherium* este un leneș terestru care apare spre sfârșitul Pliocenului și ajunge la șase metri lungime, cântărind patru tone.

Începând din Eocenul mijlociu, America de Sud suferă o serie de invazii: rozătoare și primate mici sosesc din Africa. Cele două continente sunt acum apropiate, și se crede că multe animale traversează oceanul plutind în derivă pe trunchiuri de copac. Formarea în urmă cu trei milioane de ani a istmului Panama, care leagă America de Nord de America de Sud, a declanșat *Marele Schimb American*. Multe mamifere din America de Nord se îndreaptă spre sud, iar cele din America de Sud se îndreaptă spre nord. Gliptodonții (împreună cu rudele lor mult mai mici) și megaterienii ajung în America de Nord, intersectându-se pe drum cu rozătoare, urși, pume, jaguari, lei americani, smilodoni și lupi, care merg în sens opus. Climatul mai rece al Americii de Nord

reprezintă însă o barieră: multe specii din sud, adaptate climei tropicale, nu ajung mai departe de America Centrală.

După milioane de ani de evoluție de la pești cu înotătoare lobate la tetrapode terestre care și-au adaptat toate acele sisteme biochimice și fiziologice folosite în apă, s-ar părea că nu mai există cale de întoarcere. Dar nu așa funcționează evoluția. Viața se adaptează oriunde găsește o nișă potrivită, iar dacă un ecosistem acvatic pare să ofere condiții mai favorabile decât cele de pe uscat, animalele terestre ar putea să-l prefere. În acest context, „mai favorabil" poate însemna pur și simplu că mediul acvatic oferă mai multe resurse de hrană, dar și că asigură un adăpost împotriva prădătorilor de pe uscat.

Pakicetus este un gen dispărut de mamifer descoperit în Pakistan, în roci datând din Eocen. Seamănă cu aproape toate mamiferele din acea perioadă – cam de mărimea unui câine, cu patru picioare, bot lung și coadă lungă. Însă așa cum la peștii cu înotătoare lobate, oasele înotătoarelor anticipează adaptarea la mersul pe uscat, *Pakicetus* are oasele membrelor și structura urechii interne potrivite vieții subacvatice. El ocupă un habitat semiacvatic pe litoralul Oceanului Thetys. Stă complet scufundat în apă, având însă în raza vizuală și uscatul, atent la prădătorii și la prada din ambele medii. Desigur, *Pakicetus* nu–i o balenă, dar e considerat un reprezentat arhaic al ordinului *cetaceelor*, din care fac parte mamifere marine precum balenele, delfinii și marsuinii. La fel cum putem urmări adaptările evolutive de la *Eusthenopteron* la *Casineria* (figura 82), putem urmări și adaptările care ne duc înapoi în mare, de la *Pakicetus* la *Ambulocetus* (care înota și mergea la fel de bine), la *Remingtonocetidae*, la *Protocetidae* (cu membrele ca niște înotătoare), până la *Basilosauridae,* spre sfârșitul Eocenului, care seamănă mult cu balenele și ating lungimi de 18 metri.[228]

Evoluția nu reinventează branhiile. Acestea sunt tot mamifere – au plămâni, inspiră oxigenul din aer și expiră dioxid de carbon. Ele sunt însă adaptate la lungi perioade subacvatice, ținându–și literalmente respirația (până la două ore, la unele specii). Se întorc la suprafață pentru a lua o gură de aer și a expira, printr-o răsuflătoare care odinioară era orificiul nazal din vârful botului.

Faceți cunoștință cu primatele

Pe acest fond de evoluție exuberantă a mamiferelor, primatele trec aproape neobservate. În clima caldă de la mijlocul Eocenului, pădurile tropicale acoperă o mare parte din uscat. Primatele sunt perfect adaptate vieții în copaci. Sunt mici, unele sunt active ziua, altele noaptea (nocturne), se hrănesc cu frunze, fructe şi insecte.

Oamenii de știință n-au căzut încă de acord asupra caracteristicilor distinctive ale ordinului primatelor, vreo zece la număr. Acestea includ ochi apropiați și orientați înainte pentru o vedere stereoscopică, picioare care pot apuca, având un deget mare „divergent", mâini care pot apuca, având un deget mare opozabil, și dimensiune mărită a creierului. Există mereu excepții, primate care nu prezintă toate aceste caracteristici (de pildă, oamenii sunt primate, dar degetul mare de la picior nu e divergent). În linii mari însă, un animal adaptat vieții în copaci are nevoie deopotrivă de agilitate și isteţime.

Primatele se împart în două subordine. Subordinul *strepsirrhine* („nas umed") include adapoidele diurne din Eocen, cele mai multe dispărând la sfârșitul epocii. Strepsirine moderne sunt lemurienii și lorișii. Subordinul *haplorrhine* („nas uscat") include familia *Omomyidae* – dispărută între timp, maimuțe nocturne înrudite cu tarsierii – și antropoidele sau „primatele superioare".

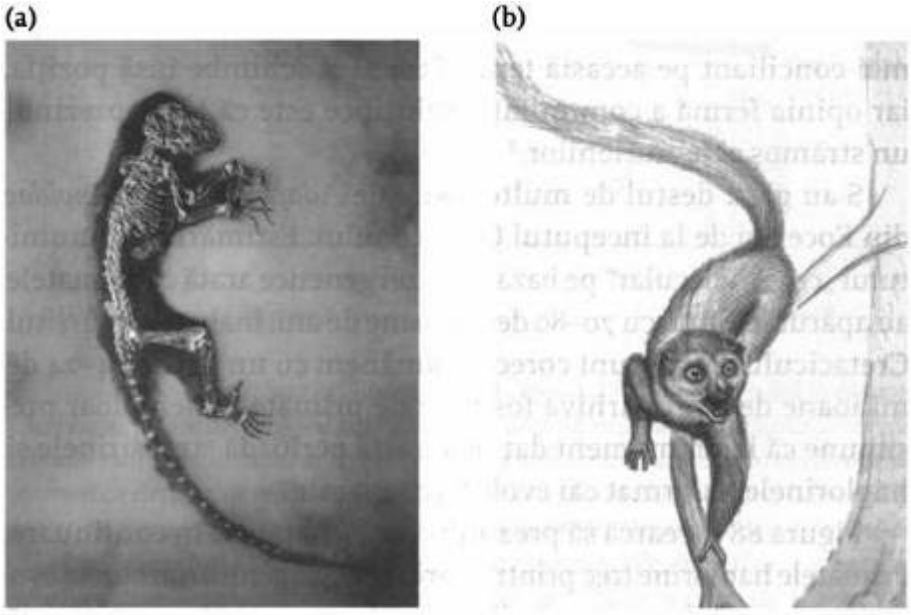


Figura 87. *Hurum și colegii săi susțineau că fosila Ida (***Darwinius masillae***), imaginea (a), este o strepsirină cu unele trăsături ale primelor haplorine, ceea ce o făcea să fie un fel de „verigă lipsă" între cele două subordine de primate. Acum se crede că Ida e o primată strepsirină înrudită cu lemurienii și nu ne spune nimic despre evoluția haplorinelor.*

Anunțul descoperirii unei fosile de primat la cariera Messel în 2009 a provocat numeroase dispute. Paleontologul norvegian Jørn Hurum de la Muzeul de Istorie Naturală a Universității din Oslo și colegii săi susțineau că această fosilă de primat excelent conservată (botezată Ida, după fiica lui Hurum) e un adapoid având unele trăsături comune cu primele haplorine (figura 87). Ei susțineau că Ida reprezintă deci un fel de „verigă lipsă" de la începutul evoluției primatelor, și conchideau: „Caracterele ei definitorii o apropie mai curând de haplorine decât de strepsirine."[229] Era anul bicentenarului lui Darwin (născut în februarie 1809), iar fosila a fost numită *Darwinius masillae.*

Nu refuzul de a accepta această concluzie a fost principalul motiv de controversă. Hurum a publicat în Norvegia câteva cărți de popularizare a științei despre evoluție și are frecvente apariții la radio și televiziune. Ce a înfuriat mai ales comunitatea științifică a fost atacul mediatic atent orchestrat care a însoțit anunțul. Acesta a fost difuzat în direct la BBC și preluat de alte 40 de televiziuni din lumea întreagă, iar Google și-a schimbat logoul în acea zi. A fost mai curând o lansare de produs, decât un anunț științific. Au apărut un site web[230], un documentar (intitulat

The Link) şi o carte (intitulată tot *The Link,* scrisă de Colin Tudge). Documentarul avea comentariul lui David Attenborough şi a fost difuzat o săptămână mai târziu de BBC.

Antropologul american John Fleagle de la Universitatea Stony Brook din New York, expert în evoluţia primatelor, a respins categoric afirmaţia, declarând că Ida e o veche strepsirină, mai apropiată de lemurieni decât de maimuţe şi primate, ca atare nu ne spune nimic despre evoluţia oamenilor. A fost unul dintre referenţii anonimi ai articolului pe care se baza anunţul şi le-a cerut autorilor „să aibă un ton mai reţinut". După un an, a scris un text ceva mai conciliant pe această temă, fără să–şi schimbe însă poziţia, iar opinia fermă a comunităţii ştiinţifice este că Ida reprezintă un strămoş al lemurienilor.[231]

S-au găsit destul de multe fosile de *Adapoides* şi *Omomyidae* din Eocen şi de la începutul Oligocenului. Estimările aşa–numitului „ceas molecular" pe baza analizei genetice arată că primatele au apărut în urmă cu 70–80 de milioane de ani, înainte de sfârşitul Cretacicului. Dacă sunt corecte, rămânem cu un gol de 14–24 de milioane de ani în arhiva fosilelor de primate. Putem doar presupune că la un moment dat în această perioadă strepsirinele şi haplorinele au urmat căi evolutive separate.

Figura 88 încearcă să prezinte ce s-a întâmplat în continuare. Primatele haplorine trec printr-o serie de divergenţe în arborele evoluţiei, ajungându-se în cele din urmă la oameni (dar amintiţi-vă toate avertismentele privind reprezentările bazate pe structuri arborescente). Primele care se separă într-o ramură distinctă sunt tarsiiformele, pe la mijlocul Eocenului. Arealul lor se întindea pe atunci în nordul Africii, Europa, Asia şi America de Nord, dar acum tarsierii se găsesc doar în insulele din Asia de Sud-Est.

Pe cealaltă ramură se află antropoidele. Depresiunea Fayum din Egipt, la vest de Nil şi la sud de Cairo, e o sursă bogată de fosile de antropoide primitive. Una dintre cele mai cunoscute e *Propliopithecus zeuxis,* de dimensiunea unui câine, cu bot lung şi canini proeminenţi. Trăieşte probabil în coronamentul copacilor, hrănindu-se în principal cu fructe moi. Spre sfârşitul Eocenului, linia antropoidelor diverge. Se desprind platirinele („nas turtit"), numite şi maimuţele din Lumea Nouă. Sunt

animale de talie medie, iar unele dintre ele posedă cozi prehensile (adaptate pentru a apuca ramuri și obiecte).

Până acum clima a fost destul de generoasă, dar temperaturile globale încep să scadă. Calotele glaciare reapar la ambii poli, iar stratul de gheață antarctic crește rapid. Când America de Sud se desprinde

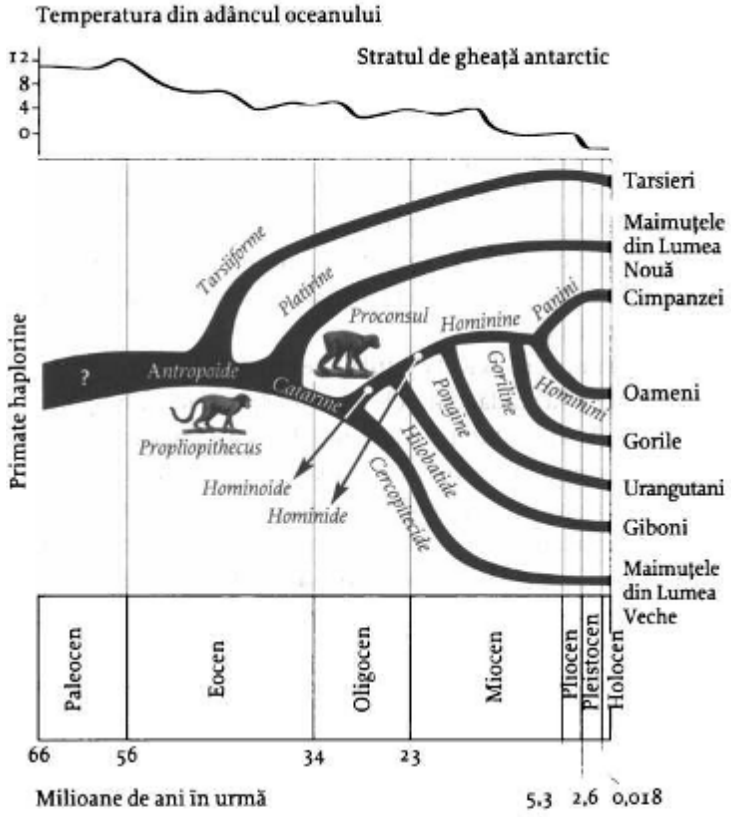


Figura 88. *Evoluția primatelor haplorine de la începutul Paleocenului până în prezent. Cum există puține dovezi fosile din Paleocen, pe această secțiune a trunchiului arborelui evolutiv e un semn de întrebare (se estimează că haplorinele s-au separat de strepsirine în urmă cu circa 63 de milioane de ani). Natura, locul și momentul acestor divergențe evolutive depind de clima globală, iar odată cu scăderea temperaturilor începând cu sfârșitul Paleocenului (reprezentată aici prin temperaturile din adâncul oceanului, determinate pe baza raporturilor izotopilor de oxigen), pădurile tropicale (și primatele care trăiesc în ele) se retrag în Africa și în părți din Asia.*

complet de Antarctica apare Strâmtoarea Drake și se creează Curentul Circumpolar Antarctic care aduce la suprafață apă rece din adâncul oceanului. Pădurile se restrâng, amenințând existența primatelor care au ajuns să depindă de ele. Dovezile fosile sugerează că de acum încolo evoluția primatelor se desfășoară în principal în Africa și în Asia.

La mijlocul Oligocenului linia catarinelor („nasul în jos”) se ramifică în cercopitecide (maimuțele din Lumea Veche) și hominoide. În Kenya au fost găsite câteva fosile de hominoide primitive, cea mai cunoscută fiind craniul unui *Proconsul* descoperit în 1948 de Mary Leakey, soția Louis Leakey, ambii paleoantropologi. E o ființă care se deplasează prin copaci pe toate cele patru picioare, însă nu are coadă, iar locul ei printre hominoide e în continuare subiect de dezbateri. Numele, însemnând „înainte de Consul”, trimite la un cimpanzeu faimos de la grădina zoologică din Londra, botezat Consul. Mâinile lui au proporții asemănătoare celor umane, și s-ar părea că e capabil să apuce mici obiecte cu oarecare precizie. Trăiește în pădurile tropicale, dar și în medii sezoniere, și e posibil ca uneori să coboare din copaci.

Pe la sfârșitul Oligocenului, următorul grup care diverge e cel al hilobatidelor. Acestea sunt gibonii, care se găsesc în zone ale Asiei, din nord–estul Indiei până în Indonezia și Filipine. Iar astfel, pe la începutul Miocenului, ajungem la hominide sau „primatele superioare”.

Planeta maimuțelor

Africa intră acum în contact cu Europa și există dovezi că formarea unei punți de uscat între cele două continente cu 17 milioane de ani în urmă înlesnește migrația hominoidelor din Africa în Europa. Fosile de hominoide din această perioadă au fost găsite în Germania și Turcia.

În 2004, antropologul spaniol Salvador Moya–Sola și colegii săi de la Institutul de Paleontologie Miquel Crusafont au descoperit lângă Barcelona un schelet incomplet vechi de 12–13 milioane de ani. Era un mascul cam de mărimea unui cimpanzeu și se hrănea probabil cu fructe. Analiza anatomiei lui a scos la iveală multe caracteristici ale primatelor superioare, dar și unele caracteristici ale maimuțelor mici. A fost numit *Pierolapithecus catalaunicus* (după localitatea Pierola din Catalonia) și s-a spus că e înrudit îndeaproape cu ultimul strămoș comun al primatelor superioare, ceea ce a stârnit în mass–media obișnuitele discuții despre „veriga lipsă”.

Dacă atribuirea e corectă (și întotdeauna există opinii contrare), atunci *Pierolapithecus* se află pe linia evolutivă a hominidelor înainte ca aceasta să se ramifice în pongine (urangutani) și hominine, subfamilia

din care vor evolua gorilele, cimpanzeii și oamenii. Această „planetă a primatelor superioare”[232] dăinuie câteva milioane de ani. Ne putem face o idee despre felul cum arătau aceste ființe din fosilele Miocenului târziu, cu vreo 9 sau 10 milioane de ani în urmă. Dovezile sugerează că existau două grupuri distincte.

Indivizii din primul grup au dinți și mandibule asemănătoare cu ale *Proconsul*-ului, indicând că se hrăneau cu fructe. Membrele lor sunt potrivite unei vieți arboricole – se mișcă folosindu-se de brațele puternice pentru a se legăna de pe o creangă pe alta, și nu pentru a merge de-a lungul lor, cam la fel ca urangutanii de azi. Habitatele lor din sudul Europei sunt subtropicale și foarte umede, cu anotimpuri ploioase (musoni).

Indivizii din al doilea grup se deosebesc mult de *Proconsul.* Au dinți mai puternici, cu un strat gros de smalț, și mandibule solide, sugerând că se hrănesc cu fructe tari, nuci și semințe, iar habitatul lor e sezonier, cu lungi perioade de secetă. Se simt în largul lor atât în copaci, cât și la sol. Nu sunt special adaptați pentru a sta atârnați de crengi și se pare că parcurgeau distanțe lungi mergând (în patru labe), și nu legănându-se de pe o creangă pe alta. Tot ce a rămas de pe urma lor sunt oasele fosilizate și dinții, însă putem deduce felul în care trăiau.

La fel ca oamenii, primatele superioare de azi sunt animale sociale. Gorilele formează grupuri poligame (cete) conduse de un mascul dominant, care e mai mare și se distinge prin părul alb – sau argintiu – de pe spate. Diferențele substanțiale de dimensiuni între masculii și femelele de aceeași vârstă se numește *dimorfism sexual* Masculul dominant are multe responsabilități sociale, cum ar fi rezolvarea conflictelor, protejarea cetei și conducerea ei spre sursele de hrană. Esența vieții sociale derivă din legăturile dintre masculul dominant și femelele sale (dar și din legăturile dintre femele și progeniturile lor). Masculii tineri din grup sunt acceptați atâta timp cât părul lor de pe spate rămâne negru – când se albește, pot fi alungați și vor pleca pentru a–și constitui propria ceată.

În societățile de cimpanzei, masculul dominant nu e neapărat cel mai mare, ci poate fi cel mai viclean și mai abil politic, capabil să influențeze grupul (numit comunitate), care include mai mulți masculi dispuși să–și

etaleze forța. Comunitatea e mai complexă și mai ierarhizată decât ceata de gorile, femelele formând propriile lor structuri matriarhale care le pot oferi acces prioritar la hrană.

Grupuri de femele puternice pot uneori prelua conducerea, izgonind un mascul dominant care și-a pierdut sprijinul lor și înlocuindu-i cu altul.

Ambele exemple de societăți ale primatelor superioare sunt rezultatul a milioane de ani de evoluție și dezvoltare socială, iar pe o asemenea scară a timpului multe se pot schimba, după cum vom vedea în curând, însă nu e greu să ne imaginăm scene din viața de zi cu zi a homininelor de la sfârșitul Miocenului. Dimorfismul sexual trimite la structuri sociale mai aproape de ceată decât de comunitate.

Gorilele diverg pentru a–și urma propria lor cale evolutivă, care va duce, între altele, la memorabilele întâlniri cu Dian Fossey[233] sau David Attenborough. Cimpanzeii fac același lucru acum circa 5–7 milioane de ani, linia homininelor separându-se în hominini și panini. Toate dovezile arată că această ultimă ramificare a avut loc în Africa. Doar cinci milioane de ani ne despart de prezent și ne aflăm în fine pe linia evolutivă care duce la oameni.

Oamenii și cimpanzeii au un număr de gene comparabil (22.763, respectiv 20.947). Un studiu efectuat de Matthew Hahn și colegii săi de la Universitatea Indiana din Bloomington, Illinois, a determinat că 93,6% din aceste gene sunt comune celor două specii. E ceva mai puțin decât estimările de la începutul anilor 1970, dar mai mult decât suficient pentru a demonstra recenta noastră origine comună. Diferențele sunt rezultatul combinat al câștigului net de 689 gene noi la oameni și pierderea netă de 729 gene la cimpanzei de când s-au despărțit.[234]

Despre cimpanzei aș mai spune doar că în urmă cu două milioane de ani linia lor s-a ramificat dând naștere cimpanzeilor moderni și bonobilor („cimpanzei pitici”). Atât de strâns înrudiți suntem cu verii noștri primate, încât cercetătorul american Jared Diamond și-a intitulat celebra sa carte din 1991 *Al treilea cimpanzeu*.

Urme de paşi pe nisipul timpului

Majoritatea desenelor care ilustrează evoluţia umană prezintă o succesiune liniară de la o primată cu mers patruped, în stânga, la un om mergând drept (biped), în dreapta. Gould a criticat asemenea imagini în cartea sa *Wonderful Life*, şi pe bună dreptate, căci, aşa cum vom vedea, povestea evoluţiei umane e mai complicată. Concentrându-se asupra mersului biped, aceste desene surprind totuşi un adevăr important.

Desigur, evoluţia a inventat deja mersul biped de mai multe ori, iar astăzi numeroase specii de mamifere sunt bipede (cangurii, de pildă). La prima vedere pare însă riscant pentru o primată să meargă în poziţie verticală. Gorilele şi cimpanzeii pot s–o facă pe distanţe scurte, când îşi cară hrana sau puii, dar asta se întâmplă relativ rar. E nevoie de o restructurare la scară mare a scheletului şi a musculaturii, şi de fapt îţi încetineşte deplasarea şi devii vulnerabil în faţa prădătorilor rapizi. Cine a suferit de dureri de spate cunoaşte preţul plătit pentru poziţia bipedă.

Şi atunci, de ce s–o adopţi? De ce am ales totuşi poziţia bipedă? Există multe ipoteze şi puţine dovezi. Ar putea exista câteva motive. Deşi primii hominini se simt ca acasă în copaci, se pare că îşi petrec tot mai mult timp pe pământ. Umiditatea scade, iar retragerea pădurilor lasă spaţiu liber savanelor, care trebuie acum traversate. Poate că erupţia unui vulcan din Africa acoperă cu lavă şi cenuşă vegetaţia din apropiere, obligându–i pe locuitori să caute locuri mai sigure. În ciuda riscurilor, mersul biped e un mod eficient de a parcurge mari distanţe cu un consum redus de energie.

Arhiva fosilelor din perioada cuprinsă între 4 şi 7 milioane de ani în urmă e pestriţă, iar despre mai multe descoperiri s-a spus că se află pe linia evolutivă a homininilor care duce la oameni. Printre ele se numără *Sahelanthropus tehadensis* (vechi de 6–7 milioane de ani), *Orrorin tugenensis* (5,8–6 milioane de ani), *Ardipithecus kadabba* (5,2–5,8 milioane de ani) şi *Ardipithecus ramidus* (4,2–4,4 milioane de ani). Aceste oase sunt greu de interpretat. Multe prezintă caracteristici de primate, iar unele prezintă caracteristici umane. *Ardipithecus ramidus* are degetul mare de la picior divergent, mai potrivit vieţii arboricole

decât mersului biped curent, semnul distinctiv al evoluției homininilor. Dezbaterile continuă.

După doar câteva sute de mii de ani dovezile devin mai clare. Fosile de *Australopithecus anamensis* („primata sudică de lângă lac") au fost descoperite în Kenya și Etiopia și s-a stabilit că au o vechime de 4,1–4,2 milioane de ani. Oasele membrelor sugerează mersul biped. Să fie oare prima dovadă a începutului liniei homininilor? Pornind de la oasele adesea fragmentare și incomplete, putem reconstitui doar aproximativ anatomia și fiziologia lui *Australopithecus anamensis,* și deduce cum se deplasa. Ce bine ar fi să existe și altă cale de a obține dovezi privind mersul biped!

Imaginați–vă următoarea scenă. Trei hominini merg pe un teren proaspăt acoperit de cenușă după erupția unui vulcan aflat la vreo 20 de kilometri. Vulcanul e încă activ. Plouă, dar prietenii noștri nu par să se grăbească. Mergând, ei lasă urme în cenușa umedă pe o distanță de vreo 24 de metri (figura 89). Urmele pașilor sunt păstrate când cenușa se usucă și se întărește. La o vreme după ce homininii au trecut, vulcanul acoperă zona cu alte straturi de cenușă. Mulți ani mai târziu, când stratul conținând urmele pașilor e decopertat, analizele izotopice și stratigrafice arată că sunt vechi de circa 3,6 milioane de ani.

Acestea sunt *urmele de pași de la Laetoli,* descoperite de echipa lui Mary Leakey în 1978. Situl se află la vreo 45 de kilometri de Defileul Olduvai din Tanzania, aproape de marginea vestică a Văii Marelui Rift, o frontieră de placă divergentă unde placa africană se fisurează, presărată cu un șir de vulcani (între care Kilimanjaro, acum inactiv).

Urmele de pași de la Laetoli au fost atribuite lui *Australopithecus afarensis* („primata sudică din Afar"), altă specie de *Australopithecus,* ale cărei fosile s-au găsit în Tanzania și Etiopia. Pesemne cel mai celebru exemplar de *Australopithecus afarensis* este Lucy, descoperită în noiembrie 1974 într-un sit din Hadar, în Etiopia, de paleoantropologii americani Donald Johanson și Tom Gray. A fost recuperat 40% din scheletul lui Lucy și s-a determinat că are o vechime de circa 3,2 milioane de ani. Formal e cunoscută drept AL 288–1, dar Johanson a botezat–o „Lucy", fiindcă atunci când a fost descoperită în tabăra lor se asculta mereu cântecul trupei Beatles *Lucy in the Sky with Diamonds.*

Analiza mișcărilor care e probabil să fi produs urmele de la Lateoli, combinată cu datele anatomice ale lui Lucy, arată că oasele și mușchii se adaptaseră la acea vreme mersului de tip uman.[235] Un picior de aceeași vechime descoperit în Africa de Sud pare să indice că degetul mare de la picior rămâne divergent, dar în mult mai mică măsură decât la *Ardipithecus.* Deși tălpile, picioarele și bazinul sunt de tip uman, brațele păstrează totuși anumite caracteristici de primată, ceea ce sugerează că *Australopithecus* încă avea nevoie să se cațere în copaci, probabil pentru a scăpa de prădători.

O specie mai recentă, *Australopithecus africanus* („primata sudică din Africa"), fusese descoperită încă din 1924. Muncitorii unei cariere de calcar din Taung, Africa de Sud, au găsit craniul fosilizat al unui copil.

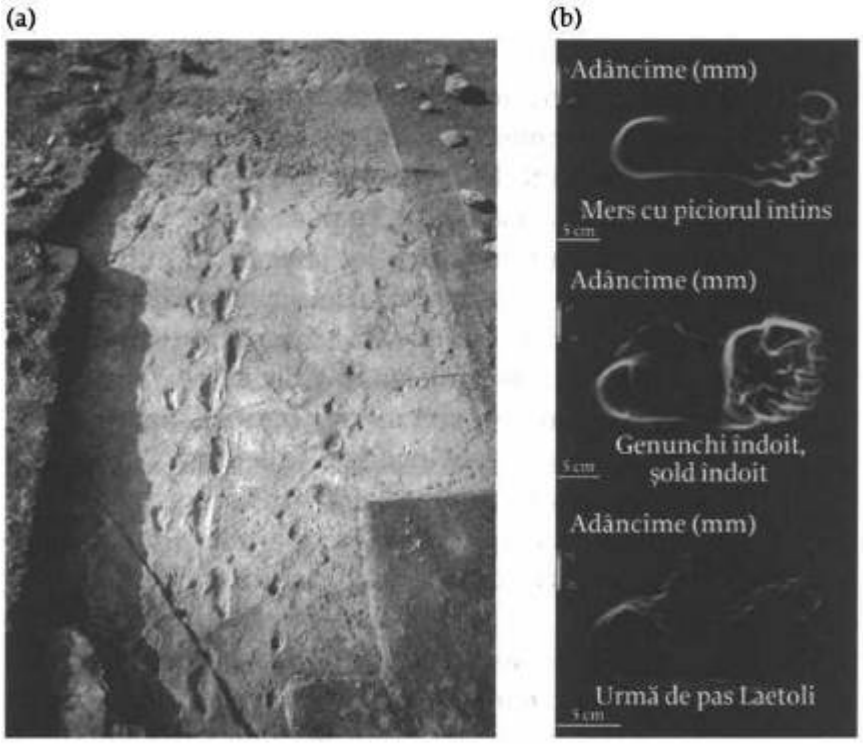


Figura 89. *Urmele de paşi de la Laetoli (a), vechi de circa 3,6 milioane de ani, au rămas întipărite în cenuşa vulcanică umedă, care apoi s-a întărit şi a fost acoperită şi conservată de noi straturi de lavă. Se crede că au fost lăsate de trei hominini din specia* **Australopithecus afarensis**. *Imaginea (b) prezintă scanarea tridimensională a unor urme experimentale de paşi lăsate de oameni moderni cu un mers normal, cu piciorul întins şi cu un mers de tip primată, cu genunchiul şi articulaţia şoldului îndoite (ca la cimpanzei). Observaţi că mersul de tip primată lasă urme mai adânci, în special în zona degetelor. Acestea sunt comparate cu o scanare tridimensională a unei urme găsite la Laetoli. Mersul pare să semene mai mult cu cel uman decât cu cel al unei primate. Adaptat după David A. Raichlen, Adam D. Gordon, William E.H. Harcourt-Smith, Adam D. Foster şi Wm. Randall Haas, Jr.,* PLoS ONE, *5 (2010) e9769.*

„Copilul din Taung" a fost predat directorului companiei care administra cariera, iar acesta i l-a dat fiului său, care l-a aşezat cu mândrie pe poliţa deasupra căminului. Josephine Salmons, studentă a profesorului anatomie Raymond Dart la Universitatea Witwatersrand şi prietenă cu fiul directorului, a văzut craniul fosil şi i l-a adus lui Dart.

După doar 40 de zile Dart a scris un articol care a fost publicat în februarie 1925 în revista *Nature.* El a numit fosila *Australopithecus africanus* şi a susţinut că ar putea reprezenta un important strămoş al omului, afirmaţie respinsă ferm (din varii motive) de comunitatea ştiinţifică. Zece ani mai târziu au fost găsite şi alte fosile de *Australopithecus africanus* într-o peşteră de la Sterkfontein, Africa de

Sud, între care un schelet aproape complet, vechi de peste două milioane de ani. La douăzeci şi cinci de ani după descoperirea iniţială, comunitatea ştiinţifică a capitulat, acceptând că *Australopithecus* ar putea fi un strămoş al omului.

Dart avusese dreptate, dar el mai susţinuse şi că australopitecinele erau vânători şi îşi cărau prada în peşterile de calcar. Nu există vreo dovadă că îşi făureau unelte, ca să nu mai vorbim de arme, şi în plus nu stăpâneau focul.[236] Se pare că erau în principal vegetarieni. Poate că au fost găsite atât de multe exemplare la Sterkfontein pentru că erau târâţi în peşteri de prădători.

Peşterile de la Sterkfontein, numite „Leagănul omenirii", sunt acum incluse în Patrimoniul Mondial UNESCO. În august 2008 Matthew Berger, fiul de nouă ani al paleoantropologului Lee Berger de la Universitatea Witwatersrand, îşi însoţea tatăl într-o plimbare prin Rezervaţia Naturală Malapa din zona peşterilor. A zărit ceva ce părea să fie o fosilă interesantă şi i-a adus–o tatălui. Lui Berger nu–i venea să creadă. Se pare că e vorba de o nouă specie, *Australopithecus sediba* („primata sudică din fântână"), veche de circa 1,95 milioane de ani. Această specie e cea mai apropiată de om dintre toate australopitecinele, având un pelvis mai adaptat mersului şi alergării eficiente, şi mâini asemănătoare nouă. Mâinile în special sugerează posibilitatea ca *Australopithecus sediba* să fi putut manevra unelte de piatră.

Berger şi colegii săi au susţinut că *Australopithecus sediba* e o verigă de legătură între *Australopithecus africanus* şi primele specii ale genului *Homo*. Există însă o problemă. După cum vom vedea, dovezile fosile pentru *Homo* sunt anterioare lui *Australopithecus sediba*– ceea ce totuşi nu exclude ca acesta din urmă să fie strămoşul primului, fiindcă originea lui poate fi anterioară fosilelor descoperite în 2008. Într-adevăr, fosilele unor specii de *Homo* sunt mai vechi decât anumite exemplare de *Australopithecus africanus.* Asta înseamnă că unele specii de *Australopithecus* şi *Homo* puteau să se fi suprapus în timp.

Povestea lui *Australopithecus* nu se încheie aici. Speciile pe care le-am prezentat au o constituţie zveltă, sunt „gracile", adică mai atletice. Există şi specii mai „robuste", atribuite iniţial genului *Australopithecus*, dar

acum sunt numite *Paranthropus robustus* și *Paranthropus boisei.* Acestea apar mai târziu, în urmă cu 2–1,3 milioane de ani, reflectând pesemne un mediu mai deschis și mai secetos, în care hrana de bază sunt nucile, semințele și rădăcinile. Aceste specii nu supraviețuiesc însă mult și se pare că atunci când primele specii de *Homo* încep să făurească unelte și să vâneze, *Paranthropus* dispare.

Unde sunt totuși strămoșii direcți ai lui *Homo*? Din păcate, nu avem un răspuns definitiv. După cum cred că ați remarcat, urmărirea evoluției oamenilor până la un punct de origine este o activitate care presupune numeroase dispute. Se pot clădi cariere. Dar la fel de bine pot fi distruse cariere (fie și temporar) prin afirmații insuficient susținute de dovezi, pe care comunitatea științifică le consideră exagerate și nejustificate. Nu ți se garantează decât dezbateri înverșunate.

Pe măsură ce speciile se diversifică, devine tot mai greu să apelezi la dovezile fosile pentru a distinge între acele specii care evoluează mai departe, acelea care evoluează spre forme diferite, dar evident înrudite, și acelea care pur și simplu nu duc nicăieri. Poate că logica ne cere să trasăm o linie directă de la *Australopithecus africanus* sau *Australopithecus sediba* la primele specii de *Homo,* dar nu vă cramponați prea tare de ideea asta. Căutarea fosilelor continuă, iar noi descoperiri pot transforma radical imaginea pe care ne-am făcut-o.

Ecce Homo

Australopitecinele reprezintă un pas evolutiv fundamental către oameni, însă deși au un mers biped, păstrează multe caracteristici de primate. Dimorfismul sexual e încă accentuat. Nu–i greu de închipuit ce tipuri de indicii trebuie să caute paleontologii pentru a ne putea continua povestea. Picioarele fiind acum destinate mersului biped, mâinile sunt libere să facă altceva. Nu–i o coincidență faptul că cele mai vechi unelte din piatră apar acum circa 2,5 milioane de ani (vezi însă precedenta notă de subsol). Ne imaginăm că mai buna coordonare între mână și ochi, impusă de făurirea uneltelor, accelerează evoluția unui creier (și a unui craniu) mai mare. Un creier mai mare și dezvoltarea corzilor vocale ușurează articularea sunetelor, și ne va conduce în cele din urmă spre vorbire și limbaj.[237]

Primele unelte de piatră au fost descoperite în Defileul Olduvai, în cursul unei expediții conduse de Louis Leakey în 1931. Defileul, adânc de 100 de metri și lung de vreo 40 de kilometri, se află în estul Câmpiei Serengeti din Tanzania. A început să se formeze cu vreo jumătate de milion de ani în urmă, când activitatea seismică a deviat un râu. Pe malurile lui abrupte se pot vedea straturi alternative de sedimente provenind din lac, din râu și din activitatea vulcanică, întinzându-se pe două milioane de ani.

Leakey le-a numit „unelte din Oldowan". Sunt confecționate prin răzuirea unor bucăți de rocă vulcanică lovindu-le una de alta. Așchiile pot fi foarte ascuțite și sunt probabil mai utile decât „miezul" rămas. Deși nu cunoaștem exact rostul uneltelor, putem bănui că sunt folosite la tăiat, ciopârțit, răzuit și zdrobit. Aceste unelte lasă urme pe oasele de animale descoperite în apropiere, ceea ce arată că utilizatorii lor tranșează carcasele. Dieta lor include acum cu siguranță și carne.

Dar cine mânuiește uneltele din Defileul Olduvai? Răspunsul n-a venit imediat. Mary Leakey a descoperit un *Paranthropus boisei* în Defielul Olduvai în 1959, însă fragmente de oase găsite în același sit un an mai târziu păreau și mai promițătoare. Dinții acestei specii sunt mai mici decât cei ai lui *Australopithecus* sau *Paranthropus*, iar capacitatea craniană e mai mare – semnul făuritorului de unelte. Louis Leakey a considerat că existau suficiente dovezi pentru a anunța descoperirea unei noi specii de *Homo* primitiv, pe care a numit–o *Homo habilis* („omul îndemânatic") într-un articol publicat în *Nature* în 1964.

Dar nu toată lumea era de acord. Lucrurile s-au complicat la începutul anilor 1970, când s-au descoperit noi fosile la Koobi Fora, pe malul estic al Lacului Turkana, în nordul Kenyei. Richard Leakey (fiul lui Louis și al lui Mary) a găsit mai multe unelte de piatră, mai multe fosile de *Paranthropus* și un craniu indicând un creier și mai mare. La austalopitecine, creierul are un volum de 400–550 centimetri cubi (cm^3), la *Homo habilis,* 550–690 cm^3, iar la craniul găsit la Koobi Fora, circa 750 cm^3.

Era oare o nouă specie? Unii susțineau că e un exemplar de *Homo habilis*, diferențele ținând de variabilitatea intraspecifică. Alții susțineau că diferențele sunt suficient de mari pentru a fi vorba de o altă specie,

botezată *Homo rudolfensis* (Lacul Turkana se numea înainte Lacul Rudolf). Alte exemplare de *Homo rudolfensis,* cu o vârstă cuprinsă între 1,78 și 1,95 milioane de ani, au fost prezentate de Maeve Leakey (soția lui Richard) și colegii ei într-un articol publicat în numărul din august 2012 al revistei *Nature.*

Ne-am obișnuit atât de mult cu ideea că suntem unica specie supraviețuitoare a genului *Homo,* încât nu ne trece prin minte că am putea împărți lumea cu o alta. Și date fiind problemele pe care le avem conviețuind cu membrii propriei noastre specii, e greu să ne imaginăm că o alta ar avea un trai bun, mai ales una pe care am considera–o inferioară. Dacă însă acceptăm atât argumentele în favoarea lui *Homo habilis,* cât și pe cele în favoarea lui *Homo rudolfensis,* atunci se pare că cel puțin două specii de oameni au coexistat la mică distanță în această parte de est a Africii acum 1,7–2 milioane de ani.

Dar, de fapt, e vorba de trei specii Fosile atribuite lui *Homo ergaster* („omul muncitor") au fost descoperite în 1975 (o mandibulă găsită în sudul Africii în 1949 se crede că aparține tot lui *ergaster*). Scheletul aproape complet al unui copil de sex masculin, în vârstă de vreo nouă ani la momentul morții, a fost descoperit lângă Lacul Turkana în 1984 de paleoantropologii Kamoya Kimeu și Alan Walker. Acest specimen, cunoscut drept „Băiatul de la Turkana" sau „Băiatul de la Nariokotome", e zvelt, are 1,5 m înălțime și volumul creierului de circa 900 cm^3. Vechimea lui este de aproximativ 1,5 milioane de ani.

Se crede acum că *ergaster* e strămoșul african al lui *Homo erectus* („omul vertical"), iar unii paleoantropologi preferă să nu facă distincția între cele două specii. Deși nu toți sunt de acord, eu propun să renunțăm la *ergaster* în favoarea lui *erectus.* Exemplare de *Homo erectus* au fost găsite în Indonezia („Omul din Java"), China („Omul din Peking") și Georgia. Chiar dacă există diferențe între exemplarele africane și cele asiatice, se crede că specia își are obârșia în estul Africii și a migrat în Asia, probabil prin extinderea teritoriului de căutare a hranei, adaptându-se apoi mediului în care s-a stabilit.

Mare parte din acest scenariu rămâne subiect de dispută, dar dacă e în general corect, atunci trei specii de *Homo* se suprapun în estul Africii: *habilis, rudolfensis* și *erectus.* Suprapunerea a durat pesemne câteva

sute de mii de ani (figura 90). Nu știm dacă unul sau altul au descins din al treilea, sau dacă toți trei au evoluat dintr-un strămoș comun. Nu putem spune nici dacă membri ai acestor trei specii diferite au trăit exact în același loc și în același timp, interacționând între ei. Dat fiind că acești oameni primitivi străbăteau teritorii întinse în căutarea hranei și apei, mi se pare greu de închipuit că nu aveau cunoștință unii de alții.

Ce e dar este că *Homo habilis* și *Homo rudolfensis* dispar din arhiva fosilelor acum vreo 1,4 milioane de ani. Nu știm de ce, dar putem bănui. Răcirea continuă a planetei în Miocen și Pliocen a provocat o serie de glaciațiuni începând din Pleistocen. Calotele de gheață se extind de la poli în ambele emisfere, ghețarii avansând și retrăgându-se ciclic, la intervale de 40.000 și 100.000 de ani până în prezent. Când pădurile se restrâng, lăsând loc savanelor, locuitorii din estul Africii își procură tot mai greu hrana.

Homo erectus are acum volumul creierului de aproape 1000 cm^3. A deprins tehnici mai avansate de făurire a uneltelor, pentru a produce toporașe („unelte acheuliene", numite după Saint–Acheul, o suburbie a orașului Amiens din nordul Franței, unde au fost descoperite pentru prima dată în 1859). Dacă

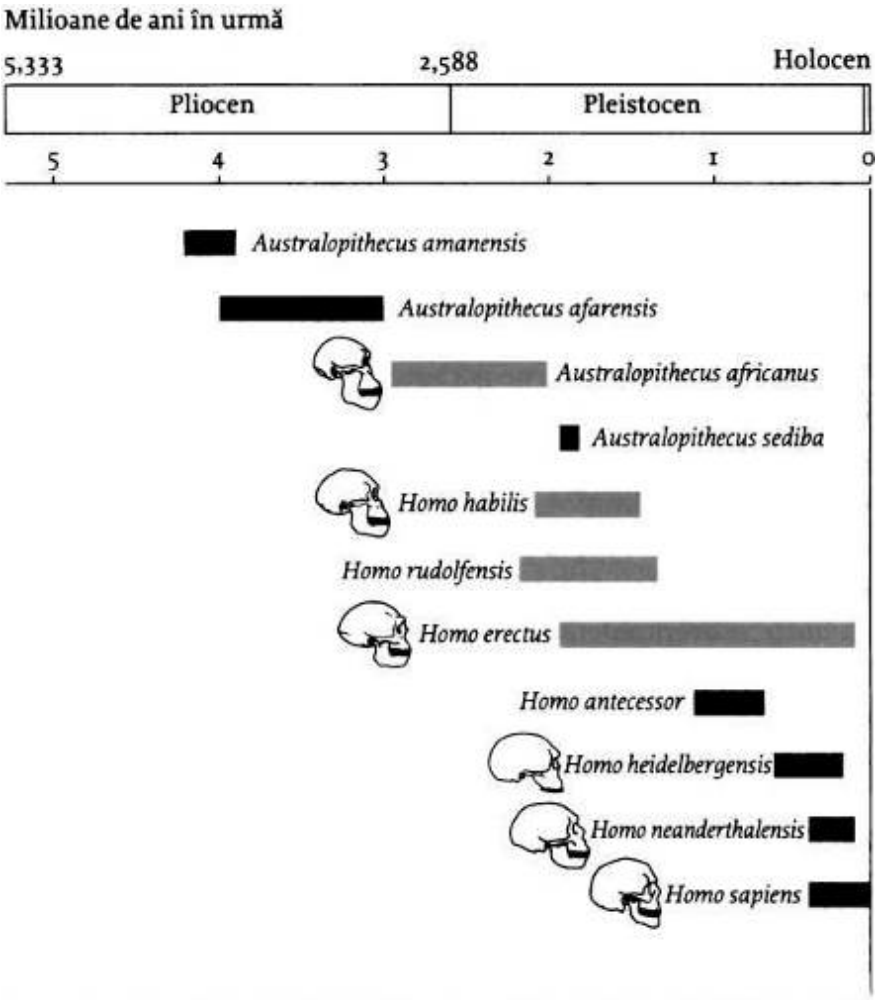


Figura 90. *Perioadele aproximative în care au trăit principalele specii implicate în povestea evoluției umane de-a lungul Pliocenului și Pleistocenului.*

perioadele în care au trăit acești oameni primitivi se suprapun, e limpede care e specia cel mai bine adaptată. *Homo erectus* poartă stindardul umanității timp de încă 1,3 milioane de ani, iar unele resturi fosile au o vechime de doar 200.000 de ani. Dacă măsurăm succesul unei specii prin longevitate, atunci *erectus* e cea mai reușită dintre toate speciile umane de până acum (dar dacă *Homo sapiens* mai supraviețuiește încă un milion de ani, bate recordul).

Pe urmele omului inteligent

Vă întrebați pesemne ce ne garantează că niște oase amestecate și niște uneltele de piatră aparțin unei specii umane distincte. Desigur, descoperirea unei noi specii umane cântărește greu în CV-ul unui paleontolog, iar asta explică de ce asemenea descoperiri sunt uneori

rapid publicate. Până în anii 1950 exista tendința de a atribui toate fosilele umane nou descoperite unor specii distincte, astfel proliferând nume precum *Homo chapellensis, grimaldi*, *mediterraneus*, *spyensis* și multe altele. Până la urmă a avut câștig de cauză rațiunea, dar fapt este că diferențele dintre specii pot fi uneori extrem de mici și de subtile.

Asta explică de ce e atât de greu să se ajungă la consens privind detaliile fine ale evoluției umane și de ce atribuirile se schimbă în timp. Exemplare despre care azi credem că aparțin unei specii distincte, mâine am putea considera că aparțin altei specii. Unii paleoantropologi au trecut la polul opus, susținând că nu există diferențe reale, ci doar o mare variabilitate în cadrul unei singure specii umane. Se spune că „oasele nu mint niciodată" și într-un anumit sens, oasele sunt dovezi concrete, incontestabile privind evoluția umană. Dar așa cum se întâmplă mereu în știință, dovezile trebuie interpretate și rareori sunt cu desăvârșire neambigue.

De ce e atât de dificil? De ce nu se invocă pur și simplu *noțiunea de specie biologică,* conform căreia speciile se diferențiază prin compatibilitatea lor reproductivă – speciile diferite nu se pot încrucișa. Asta nu înseamnă că sexul interspecific e imposibil, ci că progeniturile rezultate vor fi probabil sterile. De exemplu, hibrizii cal–măgar (catâri) sunt de regulă sterili din cauza nepotrivirii între numerele de cromozomi ai părinților.[238] Din păcate, în cazul de față această distincție nu ne e de ajutor. Există multe exemple de încrucișare interspecifică la mamifere și, după cum vom vedea, avem dovezi care indică încrucișarea între specii umane diferite. Trebuie să ținem cont de faptul că taxonomia biologică, inclusiv folosirea categoriei de specie, e o invenție umană concepută pentru a înțelege complexitatea năucitoare a vieții pe Pământ. Asemenea categorisiri devin neclare la granițele dintre ele.

Să ne imaginăm pentru o clipă că l-am putea readuce la viață pe *Homo erectus* și l-am îmbrăca în haine moderne. Să presupunem că, în urma miraculoasei învieri, n-ar avea un comportament ieșit din comun, n-ar fi prea tulburat de mediul modern. Îl întâlnim pe stradă. Observăm mersul lui, chipul lui, îl privim în ochi. Dacă trecem pe lângă el și nu ne oprim brusc, gândindu–ne că e ceva în neregulă la această persoană, aș

spune că diferenţele sunt insuficiente pentru a considera că aparţine altei specii. Eu sunt convins că *Homo erectus* ni s-ar părea ciudat, judecând după standardele noastre de *sapiens*. Forma capului, faţa turtită şi arcadele i-ar da o aparenţă agresivă, de primată.

Acest test „al întâlnirii întâmplătoare" pare cam neştiinţific, dar în cartea sa *The Origin of Our Species*, paleoantropologul britanic Chris Stringer spune povestea excentricului antropolog Grover Krantz, care a purtat o frunte modelată după cea a lui *Homo erectus* timp de şase luni, pentru a explora posibilele ei avantaje anatomice. El a constatat că îi proteja ochii de lumina Soarelui şi împiedica părut să-i între în ochi când alerga. Dar ce l-a interesat cel mai mult pe Stringer a fost faptul că, noaptea, această apariţie înspăimânta lumea. „Cred că [fruntea teşită] putea avea la oamenii primitivi şi un rol de avertizare, accentuând privirile agresive, mai ales la bărbaţi", scrie Stringer.[239]

Povestea noastră se complică acum, deoarece *Homo erectus* migrează din Africa, trecând întâi în Asia, iar apoi în Europa. Până în momentul de faţă, toată „acţiunea" evoluţiei a avut loc în Africa, dar succesul lui *Homo erectus* a făcut ca evoluţia umană să nu mai fie restrânsă la o singură zonă geografică.[240] În Europa, găsim rămăşiţe de *Homo antecessor* („*omul* predecesor"), considerat a fi descendentul european al lui *Homo erectus,* într-un sistem de peşteri calcaroase din nordul Spaniei. *Antecessor* are o vechime de 850.000 de ani, iar volumul creierului este de circa 1000 cm^3 cam la fel ca la *erectus.* E vorba de fosilele câtorva indivizi, unii copii, şi există semne de canibalism.

Dovezile din alte situri sunt destul de sărace. Unelte atribuite lui *antecessor* au fost găsite în Franţa şi în Anglia. În mai 2013, în urma eroziunii falezei de lângă Happisburgh (Norfolk), au apărut urme fosile de paşi cu o vechime cuprinsă între 1 milion şi 780.000 de ani. Se crede că au fost lăsate de cinci *Homo antecessor*, adulţi şi copii, cu înălţimi între 1,6 şi 1,73 metri. La mai multe urme, degetele de la picioare sunt clar vizibile.[241] Nu ştim exact ce s-a întâmplat cu *antecessor,* iar specia dispare din arhiva fosilelor acum vreo 700.000 de ani. S-ar părea că extincţia lui a fost provocată de apariţia unui descendent african al lui *erectus,* numit *Homo heidelbergensis.*

Una dintre cele mai bine conservate fosile umane a fost găsită în 1921 în mina Broken Hill din nordul Rhodesiei (în prezent Zambia). Craniul i-a înspăimântat pe muncitorii care l-au găsit, dar supraveghetorul lor, Tom Zwigelaar, era mai puţin superstiţios şi s-a fotografiat cu craniul în mână. Craniul a fost apoi achiziţionat de Muzeul de Istorie Naturală din Londra, unde e expus actualmente. Un mulaj din ghips al craniului l-a impresionat atât de puternic pe tânărul Chris Stringer, care vizita muzeul împreună cu părinţii, încât l-a studiat în teza lui de doctorat şi şi-a dedicat o mare parte din carieră căutându–i locul în povestea evoluţiei umane. Vreme de 15 ani, Stringer a încercat să dateze cu precizie craniul (estimări recente dau o vârstă de ordinul a 300.000 de ani).

Craniul a fost numit *Homo rhodesiensis* („omul din Rhodesia"), dar ulterior s-a stabilit că aparţine altei specii umane, *Homo heidelbergensis* („omul din Heidelberg"), descoperită în 1907 la Mauer, lângă Heidelberg. Convenţia denumirii speciilor spune că descoperirea mai veche are întâietate, astfel că *rhodesiensis* a devenit *heidelbergensis*, ceea ce ne pune într-o situaţie ciudată. Omul din Heidelberg se crede că descinde din *Homo erectus.* Numele speciei ne spune unde a fost găsită prima dată, nu unde îşi are originea.

Homo heidelbergensis are fruntea teşită, dar capul mai puţin turtit, nasul proeminent şi volumul creierului în intervalul 1100–1400 cm^3, care conţine media de 1350 cm^3 a lui *Homo sapiens*. Uneltele de piatră asociate cu *heidelbergensis* sunt mai sofisticate şi există dovezi că, în urmă cu 500.000 de ani, unii dintre membrii speciei făceau suliţe cu vârfuri de piatră pentru vânătoare. Ei comunicau pesemne prin forme primitive de vocalizare, mormăind sau imitând sunetele animalelor.

Nu ştim exact de unde provine *heidelbergensis*, dar, la fel ca *erectus,* a migrat din Africa în Asia şi în Europa. Fosile atribuite lui *heidelbergensis* au fost găsite în Germania, Franţa, Marea Britanie, Grecia, Italia, Israel şi China. Fosilele găsite la La Sima de los Huesos (Grota Oaselor) lângă Atapuerca, în nordul Spaniei, s-a bănuit iniţial că aparţin lui *heidelbergensis,* dar acum se crede că sunt ale unui descendent, *Homo neanderthalensis*.

Încă o dată, tiparele de migrație a speciilor oferă prilejuri de dezvoltare evolutivă în diferite locuri, și putem identifica două linii care descind din *heidelbergensis.* Una este *Homo neanderthalensis* („omul din Valea Neander"), adaptată climei mai reci din Europa și vestul Asiei. Cealaltă își are obârșia în Africa și se numește *Homo sapiens* („omul inteligent").

Neandertalienii au avut parte de o presă defavorabilă. Au fost adesea prezentați ca niște sălbatici păroși locuind în peșteri, înceți la minte și rudimentari (în 1866, naturalistul german Ernst Haeckel a propus denumirea *Homo stupidus*). Sunt ceva mai robuști decât verișorii lor africani și trăiesc într-adevăr în peșteri. Se pare însă că își cinstesc morții și îi îngroapă în aceleași peșteri, crescând astfel șansele de fosilizare și conservare, spre norocul nostru. S-au găsit fragmente de oase aparținând unui număr de peste 500 de neandertalieni în Europa și în estul Asiei, iar vreo 20 de schelete sunt aproape complete.

Primii neandertalieni apar acum circa 400.000 de ani și dispar din arhiva fosilelor în urmă cu 35.000 de ani. Au capul puțin mai mare decât al oamenilor moderni, craniu turtit, nas proeminent, arcade groase. Mă îndoiesc că un neandertalian ar trece testul „întâlnirii întâmplătoare".

Cu un volum de 1400 cm^3, creierul lor e în medie mai mare decât al oamenilor de azi, dar au lobul frontal mai mic și lobul occipital (pentru procesarea informației vizuale) mai mare, pesemne o adaptare care să le sporească acuitatea vizuală necesară vânătorii și deplasării în lumină slabă. Volumul creierului, de unul singur, nu este cel mai bun indiciu al „inteligenței", și se cuvine să comparăm rapoartele dintre volumul creierului și masa corpului, numite coeficienți de encefalizare (EQ). *Homo heidelbergensis* are un EQ de 3,4–3,8, *neanderthalensis* de 4,3–4,8, iar *sapiens* de 5,3–5,4 (figura 91).

Neandertalienii sunt scunzi și îndesați, au oase groase și constituție musculoasă, fiind adaptați climei din Europa epocii glaciare. Unii au tenul palid. Făuresc un tip de unelte de piatră numit „musterian" (după Le Moustier, peștera din Franța unde au fost identificate pentru prima oară): răzuitoare, vârfuri ascuțite și cuțite, dintre care unele sunt fixate de mânere din lemn. Probabil că folosesc piei de animale ca

îmbrăcăminte rudimentară. Se pare de asemenea că stăpânesc focul. Pesemne că vorbesc, folosind un limbaj primitiv.

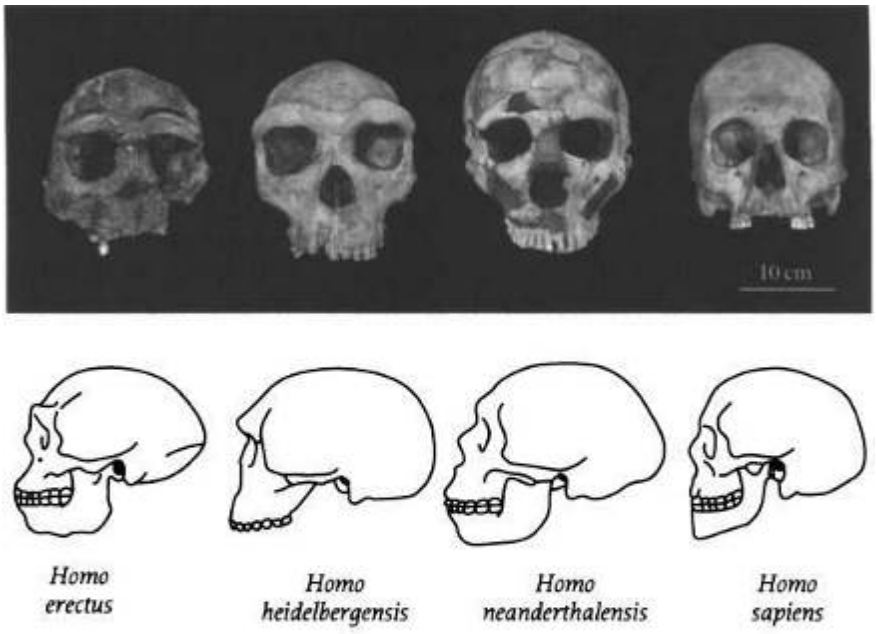


Figura 91. *Oasele nu mint niciodată. Comparație între craniile fosile de* **Homo erectus** *din Asia (specimenul Sangiran 17 din Java, vechi de circa 700 000 de ani),* **Homo heidelbergensis** *din Africa (Broken Hill 1, Zambia, vechi de circa 300 000 de ani),* **Homo neanderthalensis** *din Europa (Le Ferrassie 1, Franța, probabil vechi de 70 000 de ani) și* **Homo sapiens** *din Asia (craniul unui om modern din Polinezia).*

Un alt grup de oameni primitivi, denisovanii, a fost descoperit în 2008 în Peștera Denisova din Munții Altai, în sud–vestul Siberiei. Paleoantropologii au estimat că rămășițele (doar o falangă și un molar) datează de acum circa 50.000 de ani. Se crede că denisovanii descind din *Homo heidelbergensis* și reprezintă un fel de grup–soră asiatic al neandertalienilor, iar nu o specie distinctă.

Dacă neandertalienii sunt atât de bine adaptați mediului, de ce au dispărut (împreună cu denisovanii)? Voi prezenta mai jos câteva cauze, dar nu vreau să trec la *Homo sapiens* fără să menționez o altă specie umană. Flores e una dintre insulele arhipelagului Sondele Mici, la est de Java. În 2003, o echipă de paleoantropologi australieni și indonezieni a descoperit în Peștera Liang Bua din Flores rămășițele fosile ale unei noi specii umane, care a căpătat numele *Homo florensiensis.* Fosilele sunt remarcabile prin faptul că *Homo florensiensis* nu depășea înălțimea de un metru. Dat fiind succesul trilogiei cinematografie inspirată de

Stăpânul inelelor al lui J.R.R. Tolkien, membrii noii specii au fost botezaţi „hobbiţi”.

Spre deosebire de hobbiţii lui Tolkien, *Homo florensiensis* au un creier mic (circa 400 cm^3), dar sunt abili făuritori de unelte. Alături de scheletele fosile au fost găsite unelte din piatră şi urme de animale măcelărite. S-ar putea să fie descendenţi ai lui *Homo erectus,* prima specie umană care a migrat din Africa, ajunşi la dimensiuni mici ca răspuns la mediul insular limitat (fenomen numit nanism insular). Analiza structurilor osoase sugerează că ar putea fi chiar descendenţi ai unei specii hominine mai vechi, care a migrat din Africa acum 2 milioane de ani. Nimeni nu prea ştie ce–i cu ei.

Plecarea din Africa

Să recapitulăm. În urmă cu circa 200.000 de ani, planeta găzduieşte mai multe specii umane. Există venerabilul *Homo erectus*, care a apărut în Africa în urmă cu 2 milioane de ani şi s-a răspândit în Europa şi Asia. Din *erectus* descind *antecessor* (în Europa), *heidelbergensis* (în Africa, Europa şi Asia) şi, poate, *florensiensis* (în Asia). Din *heidelbergensis* descind *neanderthalensis* (în Europa), posibil denisovanii (în Asia) şi *sapiens* (în Africa). Dacă îi considerăm pe denisovani un grup–soră al neandertalienilor, avem cel puţin şase specii umane, dintre care cinci se suprapun în timp *(antecessor a* dispărut cu circa o jumătate de milion de ani în urmă).[242]

Dovezi fosile pentru unul dintre cei mai vechi *Homo sapiens* au fost găsite în Florisbad, la vreo 45 de kilometri de Bloemfontein, în Africa de Sud. Vârsta craniului de la Florisbad a fost estimată în 1996 la aproximativ 260.000 ani. Două cranii de adult şi mandibula unui copil, găsite la Jebel Irhoud, în Maroc, au vârsta de circa 200.000 de ani. Din redatarea fosilelor găsite de Richard Leakey în 1967 la Omo Kibish, în sud–vestul Etiopiei, a rezultat o vechime de 195.000 de ani. Craniile de adulţi şi copii găsite la Herto Bouri, în Valea Afar din Etiopia, au vârsta de 160.000 de ani.

Craniul e ceva mai mic, faţa mai aplatiză, nasul mai puţin pronunţat, bărbia mai proeminentă, iar fruntea teşită a dispărut în mare măsură. Ar putea trece drept oameni moderni, fără să ne atragă atenţia la testul

„întâlnirii întâmplătoare”. Deşi există mai multe teorii privind originea lui *Homo sapiens*, paleoantropologii au ajuns să adopte modelul Orginii Africane Recente, numit şi „Plecarea din Africa” (*Out of Africa*)[243], model promovat de Chris Stringer şi Gunter Bräuer de la Universitatea din Hamburg timp de peste 30 de ani. În afară de tiparele fosilelor, există şi dovezi aduse de propriile noastre gene.

Am spus în capitolul 9 că atunci când au evoluat primele celulele complexe, unii endosimbionţi bacterieni au devenit mitocondrii şi au rămas cu o anumită autonomie locală, păstrând într-un mic cromozom circular aproximativ 16.000 de perechi de baze şi dispozitivul de selectare a proteinelor. Într-un ovul uman fertilizat, ADN-ul mitocondrial (ADNmt) conţinut în acest cromozom e pur şi simplu donat de la femeie, cu o contribuţie mică, sau fără niciuna, din partea bărbatului. Aceste gene sunt deci transmise doar pe linie feminină. ADN-ul mitocondrial suferă mutaţii într-un ritm mult mai rapid decât ADN-ul nuclear, permiţând urmărirea descendenţei recente prin analize genetice. Un studiu din 1987 arăta că *Homo sapiens* are într-adevăr o ultimă strămoaşă umană comună, ratele mutaţiilor sugerând că ea a existat acum vreo 200.000 de ani. A fost botezată „Eva mitocondrială” şi trăia în Africa.

Studiul a fost puternic criticat şi, cu toate că unele proceduri aplicate erau discutabile, cercetări ulterioare au confirmat concluzia iniţială. Estimări recente o plasează pe Eva mitocondrială în urmă cu 100.000–200.000 de ani.[244] Studii asemănătoare asupra cromozomului Y, care urmăresc descendenţa exclusiv pe linie masculină, îl plasează pe „Adam Y–cromozomial” cel mai probabil în Africa, la un moment care variază de la studiu la studiu, dar în medie se situează cu aproximativ 200.000 de ani în urmă. Este extrem de improbabil ca Adam şi Eva să fi fost contemporani şi, spre deosebire de personajele biblice, nu erau singuri pe lume.

Stringer a pus cap la cap toate dovezile pentru a obţine o imagine a istoriei noastre evolutive recente (figura 92), imagine care spune în linii mari povestea prezentată aici, şi care va fi fără îndoială modificată pe măsură ce vor apărea noi descoperiri. Se poate vedea că forma modernă a lui *Homo sapiens* apare în Africa acum vreo 200.000 de ani şi

se răspândește în Africa, iar apoi în Eurasia. Noi suntem mărturia succesului lor. Migranții africani formează probabil un grup relativ mic, de câteva mii de indivizi. Poate că nu e vorba de un singur exod, ci de mai multe migrații într-un interval scurt de timp.

Din nordul Africii, ei trec în vestul Asiei acum vreo 100.000 de ani, și ajung în China acum vreo 60.000 de ani. Pornesc spre sud–est către Australia acum vreo 50.000 de ani și avansează în Europa acum vreo 45.000 de ani. Traversează pesemne Strâmtoarea Bering către Alaska acum vreo 15.000 de ani, pornind spre sud în America de Nord acum vreo 13.000 de ani, apoi în America de Sud acum vreo 12.000 de ani.

În Europa și Asia îi întâlnesc pe neandertalieni și denisovani. Analiza ADN-ului din fosilele de neandertalieni și denisovani și comparațiile cu genomul uman modern dezvăluie lucruri interesante. Aproximativ 2% din ADN-ul oamenilor moderni neafricani se regăsește în genomul neandertalienilor.[245] O mică proporție din ADN-ul neandertalienilor se găsește la denisovani, iar 4–6% din ADN-ul denisovanilor se găsește în ADN-ul melanezienilor moderni (băștinașii din Vanuatu, Insulele Solomon, Fiji și Papua Noua Guinee) și aborigenilor australieni. Se pare că tibetanii au moștenit gene adaptate vieții la mare altitudine de la strămoșii denisovani.

Aceste remarcabile dovezi ale încrucișărilor sugerează că *Homo sapiens* nu apare pur și simplu din Africa și „preia controlul”, provocând extincția celorlalte specii umane. O recentă reevaluare a dovezilor fosile arată că neandertalienii și *Homo sapiens* au coexistat în Europa vreme de 5000 de ani, așadar înlocuirea neandertalienilor n-a avut loc peste noapte.

Conform unui scenariu plauzibil, deși neandertalienii și denisovanii sunt bine adaptați unui climat care poate fi rece, aspru și brutal, apariția unei specii mai inovative și mai adaptabile îi împinge pur și simplu la margine. Europa și Asia sunt încă în perioada glaciară care a început acum 110.000 de ani și

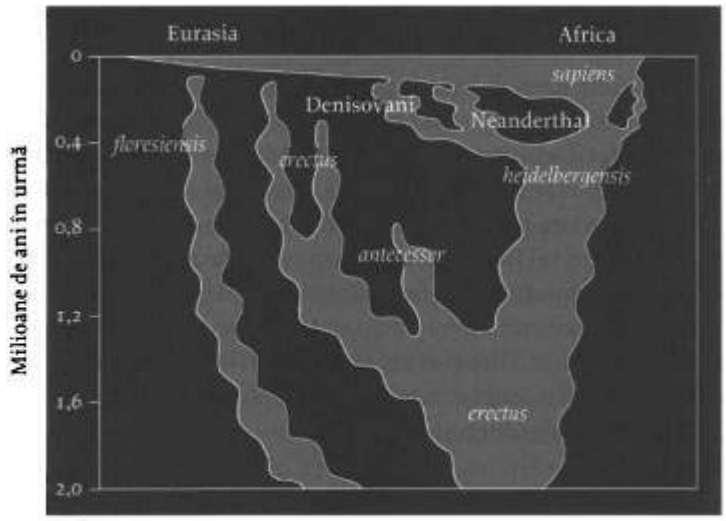


Figura 92. *Diagrama prezintă istoria evoluției umane în ultimele 2 milioane de ani, pe baza dovezilor fosile și a studiilor ADN, și distribuția oamenilor în Africa și Eurasia. Originea lui* Homo florensiensis *e incertă, dar specia s-ar putea să descindă din* Homo erectus *sau dintr-o specie mai veche de hominini.*

va continua până la începutul Holocenului, acum 12.000 de ani. Când sursele de hrană se împuținează, *Homo sapiens* este cel mai bine înzestrat pentru a supraviețui. *Homo erectus, antecesor*, *heidelbergensis* și *florensiensis* au dispărut. Dispar acum și neandertalienii, și denisovanii, dar într-o mică măsură aceste rude străvechi continuă să trăiască în noi, unicii supraviețuitori.

12
Cogito ergo sum

Originea conștiinței umane

Încă n-am terminat. Povestea evoluției umane nu se încheie cu apariția lui Homo sapiens în Africa acum 200.000 de ani și nici cu migrațiile ulterioare din Africa în Europa, Asia și restul lumii. În încercarea de a ne desluși originile, trebuie să lămurim de ce tocmai această specie va ajunge să domine planeta.

Altfel spus, ce anume ne conferă nouă, în termeni evolutivi, un caracter excepțional? Răspunsul e, desigur, forma noastră unică de *conștiință*. Am dezvoltat capacitatea de a ne reprezenta în minte lumea exterioară în moduri care ne oferă mult mai mult decât avantaje legate de supraviețuire. Prin conștiință putem ajunge la gândirea abstractă, simbolică, și ne putem crea vieți mentale complexe. Ea ne permite să

comunicăm unii cu alţii şi, cel puţin unora dintre noi, să trăim în structuri sociale extrem de complexe. Ne ajută să făurim culturi. Nici o altă fiinţă de pe Pământ nu poate face asta. Acesta e răspunsul simplu şi direct, dar el atrage după sine o mulţime de întrebări dificile. Ce e conştiinţa şi cum funcţionează? Cum şi când apare ea în povestea noastră evolutivă? Răspunsurile la aceste întrebări ne vor ajuta să ne înţelegem nu doar originile, ci şi propria noastră umanitate.

Din păcate, studiul conştiinţei îmi pare a fi singura disciplină structurată în principal în funcţie de *problemele* ei. Avem aşadar „problema grea" a conştiinţei, problema „minte–corp", problema „altor minţi" şi multe altele. Aceste probleme au generat nenumărate dezbateri şi cercetări, dar deocamdată se pare că nu există soluţii. Să rămânem totuşi optimişti. Problemele nerezolvate sunt în fond mai fascinante. S-au făcut mari progrese ştiinţifice, pe care le voi trece în revistă, dar mai întâi trebuie lămurite câteva aspecte filosofice. Să vedem deci ce credem că ştim.

Problema grea

Conştiinţa seamănă oarecum cu viaţa (vezi paragraful de la începutul capitolului 8). O recunoaştem când o trăim pe pielea noastră şi am învăţat s–o recunoaştem şi la alţii (sau cel puţin aşa credem), dar e greu să dăm o definiţie cu care toţi să fie de acord. De fapt, bănuiesc că n-avem nevoie cu adevărat de o definiţie. Ştiţi cum e să aveţi experienţe[246] conştiente privind lumea exterioară şi ce înseamnă viaţa mentală interioară. Aveţi gânduri şi vă gândiţi la acele gânduri. Ştiţi cum *este* conştiinţa voastră, sau cel puţin cum o simţiţi. Nu sună prea ştiinţific, dar pentru început cred că e suficient.

Conform filosofului american Ned Block, conştiinţa este de două tipuri. *Conştiinţa fenomenală* (sau conştiinţa F) reprezintă procesarea stimulilor externi pentru a produce experienţe mentale (ceea ce unii filosofi numesc *qualia*). În mintea noastră conştientă apar imagini vizuale, sunete, mirosuri, gusturi şi senzaţii tactile, precum şi emoţiile pe care asemenea stimuli le pot declanşa, cum ar fi bucurie, nelinişte sau teamă instinctive. *Conştiinţa de acces* (sau conştiinţa A) este „nivelul superior" de accesare, procesare şi integrare a informaţiei mentale (inclusiv a informaţiei din memorie) pentru a ne concentra atenţia, a

raționa, a comunica, a lua decizii și a ne controla comportamentul. Conștiința F ține de experiențe funcționale și emoționale derivate din informații senzoriale brute. Conștiința A își pune problema ce se poate face cu ele. Nu toți filosofii sunt de acord cu această distincție, ceea ce e valabil în genere pentru asemenea idei. În filosofie se ajunge mai curând la dispute decât la consens.

Într-un articol publicat în 1995 în *Journal of Consciousness Studies,* filosoful australian David Chalmers, specialist în științe cognitive, spunea că toate aspectele conștiinței A sunt probleme „ușoare":[247]

Problemele ușoare sunt ușoare fiindcă se ocupă cu explicarea *capacităților* și *funcțiilor* cognitive. Pentru a explica o funcție cognitivă e suficient să identificăm un mecanism care poate îndeplini funcția. Metodele științelor cognitive sunt potrivite pentru acest tip de explicație, deci sunt potrivite pentru problemele ușoare ale conștiinței.

Mă îndoiesc că sunt chiar atât de ușoare, dar Chalmers are aici în vedere *relativa* dificultate a acestor probleme, spre deosebire de cele cu adevărat grele, care țin de conștiința F. Să luăm un exemplu concret. Imaginați–vă un trandafir roșu așezat pe o mătase albă. Ne impresionează frumusețea trandafirului, roșul lui aprins pus în evidență de strălucirea mătăsii. Ce anume creează această imagine pregnantă, această realitate ispititoare? Mai exact, ce anume din lumea exterioară creează minunata experiență a culorii roșii? E de-ajuns să căutăm pe internet „pigment de trandafir roșu" și găsim că trandafirii sunt roșii fiindcă petalele lor conțin un amestec subtil de substanțe numite antociani, iar roșul e accentuat dacă trandafirii cresc într-un sol cu aciditate scăzută. Antocianii din petale interacționează cu lumina solară, absorbind anumite lungimi de undă și reflectând predominant lumină roșie. Noi privim petalele și vedem roșu. E simplu.

Dar stați puțin. Ce este mai exact „lumina roșie"? Am putea căuta un răspuns științific. Lumina roșie e radiație electromagnetică cu lungimi de undă între 620 și 750 de nanometri. Se află la capătul lungimilor de undă mari ale spectrului vizibil, între portocaliu și infraroșul invizibil. Lumina însă, după cum am văzut în capitolul 1, constă în fotoni, care n-au proprietatea intrinsecă de a fi „roșii" în acest domeniu al lungimilor de undă. În afară de diferențele de lungime de undă, nu există nimic în

proprietățile fizice ale fotonilor care să deosebească roșul de verde sau de orice altă culoare.

Putem merge mai departe. Putem urmări modificările chimice şi fizice rezultate din interacţiunile fotonilor cu celulele cu con din retină, până la stimularea cortexului vizual din zona occipitală a creierului. Oricât am căuta, nu vom găsi *experienţa* culorii roşii în toate aceste aspecte chimice şi fizice. Abia când sintetizezi informaţia procesată de cortexul vizual în mintea conştientă trăieşti senzaţia unui frumos trandafir roşu. Am putea inventa scenarii echivalente pentru toate celelalte simţuri (gust, miros, auz şi simţ tactil), şi concluzia ar fi aceeaşi. *Cum* funcţionează însă toate astea? – iată problema grea a conştiinţei, despre care vorbește Chalmers:

Problema cu adevărat grea a conştiinţei e problema *experienţei* [...]. Când vedem, de pildă, avem exper*ienţa une*i senzaţii vizuale: calitatea resimţită drept roşu, experienţa întunericului şi luminii, adâncimea în câmpul vizual. Alte experienţe merg mână în mână cu percepţia în diferite moduri: sunetul unui clarinet sau mirosul naftalinei. Există apoi senzaţiile corporale, de la durere la orgasm; imagini mentale care sunt declanşate intern; percepţia emoţiei şi experienţa unui flux de gânduri conştiente. Ce uneşte toate aceste stări e faptul că toate sunt stări ale experienţei.

Problema e grea nu atât fiindcă ne lipseşte o explicaţie fizică pentru felul în care se desfăşoară toate acestea, ci fiindcă nici măcar nu ştim cum să punem corect problema. Dar dacă problema „cum” e prea grea, am putea găsi unele indicii încercând să ne gândim la *locul* unde s-ar putea desfăşura aceste experienţe?

Problema minte–corp

Filosoful francez René Descartes este pe drept cuvânt considerat părintele filosofiei moderne. În *Discurs asupra metodei,* publicat în 1637, a pus bazele unei noi tradiţii filosofice în care nu trebuia să existe vreo îndoială privind adevărul absolut al concluziilor ei. Pornind de la adevărul absolut, susţinea el, obţinem o cunoaştere certă. Pentru a ajunge însă la adevărul absolut, el se vedea nevoit să respingă orice îi

trezea fie și cea mai mică îndoială, adică toate informațiile despre lume primite prin simțuri.

De ce? în primul rând, Descartes nu putea exclude posibilitatea ca simțurile să-l înșele uneori. Așa cum o iluzie optică creează impresia unui pătrat sau a unui triunghi care de fapt nu există (figura 93(a) și (b)), la fel și simțurile îl puteau induce în eroare. În al doilea rând, nu putea fi sigur că percepțiile și experiențele sale nu fac parte dintr-un vis sofisticat. În fine, nu putea fi sigur că nu e victima unul geniu rău care, având capacitatea de a–i manipula informațiile senzoriale, îi creează o impresie complet falsă despre lumea din jur.

Descartes simțea că era totuși un lucru de care putea fi sigur. Putea fi sigur de faptul că e o ființă cu o minte conștientă care gândește. El susținea că, în calitate de ființă cugetătoare, ar fi o contradicție să spună că nu există. Prin urmare, propria lui existență era de asemenea un lucru în privința căruia putea fi sigur. *Cogito ergo sum*, a conchis el. Gândesc, deci exist.

Lumea fizică exterioară e vagă și nesigură, și s-ar putea să nu ne apară așa cum e în realitate, însă mintea conștientă pare ceva foarte diferit. Descartes mergea mai departe, spunând că de aici rezultă că mintea conștientă e separată și distinctă de lumea fizică, inclusiv de mașinăria necugetătoare a corpului și a creierului. Conștiința trebuie să fie „altceva", de natură nefizică.

Descartes trebuia să explice cum e posibil ca un lucru care nu se manifestă fizic să se facă totuși simțit în lumea fizică, influențând și comandând mașinăria – cum poate fi, de pildă, tradus un gând într-o mișcare. Soluția lui a fost să identifice glanda pineală, un organ mic în formă de pară din mijlocul creierului, drept „sediul" conștiinței, prin care mintea nefizică îndeamnă delicat corpul fizic la acțiune (figura 93(c)). Alegerea nu era chiar arbitrară. Creierul e aproape

simetric, cu două emisfere cerebrale distincte unite printr-un mănunchi de fibre numit corpul calos. Glanda pineală are cel puțin însușirea de a fi unică într-un creier în care altminteri emisfera stângă pare o copie a celei drepte.

Dualismul minte–corp (numit și dualism cartezian) e în perfect acord cu credința în suflet sau spirit. Corpul este o carcasă, o gazdă sau un dispozitiv mecanic

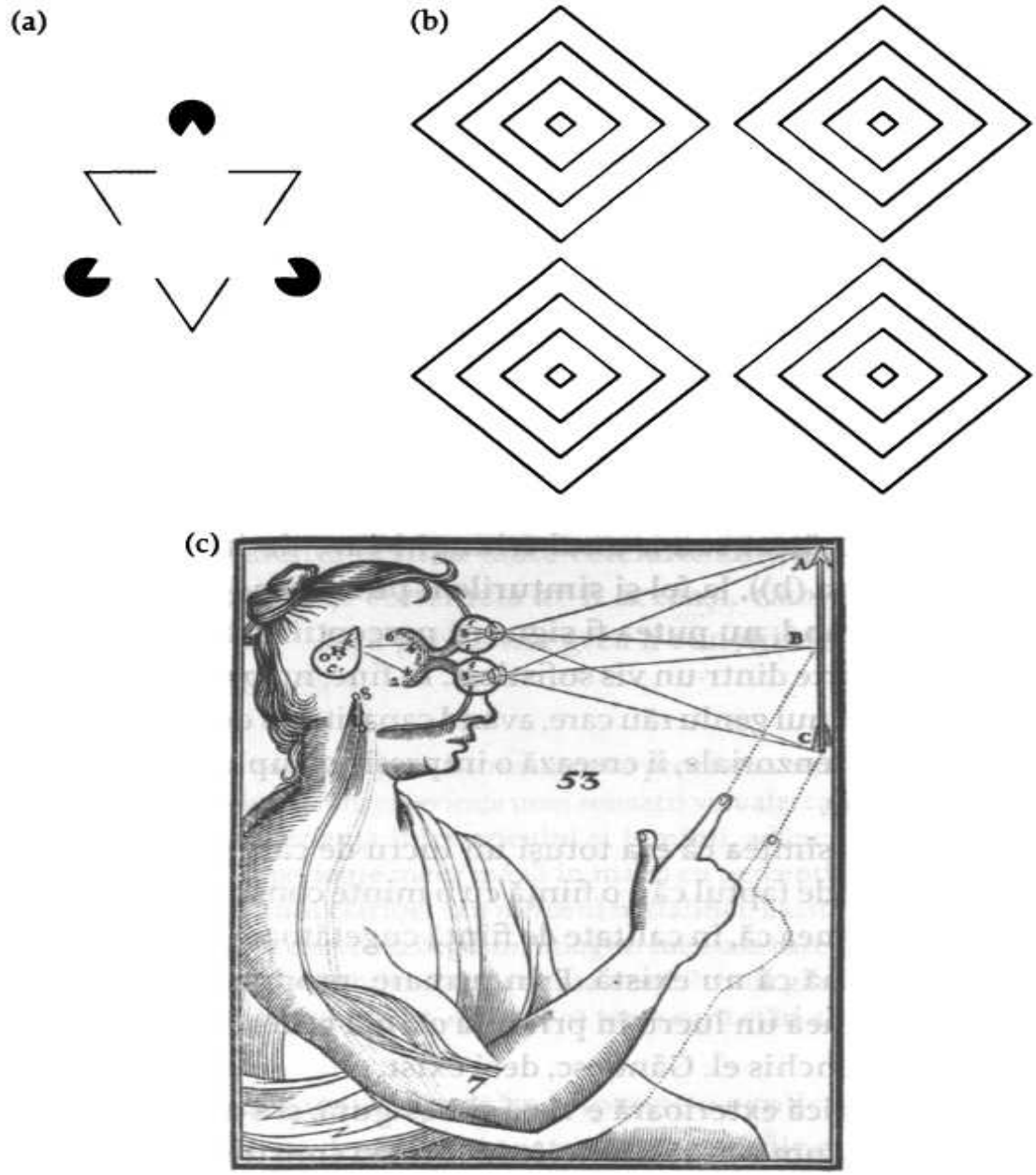


Figura 93. *Triunghiul Kanizsa prezentat de psihologul italian Gaetano Kanizsa în 1955 (a) și pătratul sugerat de laturile orientate spre centru (b) sunt exemple de iluzii cognitive – conștiința F este păcălită să perceapă obiecte inexistente. Descartes susținea că nu poți avea încredere că simțurile îți oferă o reprezentare corectă a lumii fizice exterioare. El mergea mai departe spunând că mintea și corpul sunt substanțe distincte și separate, existând independent una de alta. A identificat glanda pineală din centrul creierului drept „sediul" conștiinței, locul unde mintea nefizică interacționează cu creierul fizic (c).*

folosit pentru a da expresie și întindere substanței cugetătoare nefizice. Mintea mă definește, de corp doar mă folosesc (probabil temporar).

Descartes credea că, deşi mintea şi corpul sunt unite şi interconectate prin glanda pineală, ele pot duce o existenţă separată, independentă.

Nu pot respinge pur şi simplu raţionamentul lui Descartes despre relaţia dintre lumea fizică exterioară şi reprezentarea conştientă pe care mi–o fac despre ea – ceea ce filosofii numesc scenariul „creierului într-o cuvă": un savant malefic ţi-a scos creierul cu un timp în urmă şi îl menţine în viaţă, hrănindu-l cu semnale care îţi dau impresia unei lumi exterioare, aşa încât „stai şi citeşti aceste cuvinte despre presupunerea amuzantă şi oarecum absurdă că există un savant malefic care scoate creierele oamenilor din corp şi le pune într-o cuvă cu nutrienţi care le menţin în viaţă".[248] Această incertitudine stă la baza multor romane sau filme SF, cum e bine cunoscutul *The Matrix.* Să conchidem însă de aici că mintea conştientă e imaterială mi se pare o speculaţie neîntemeiată. Există astăzi câţiva oameni de ştiinţă şi filosofi care adoptă acest gen de dualism, dar problema e că, decuplând mintea de creier şi considerând–o imaterială, ea iese din graniţele ştiinţei şi devine inaccesibilă.

În celebra sa carte *The Concept of Mind* (*Conceptul de minte*), publicată în 1949, filosoful britanic Gilbert Ryle lua în derâdere dualismul de tip cartezian minte–corp, numindu–i „fantoma din maşinărie". În *Consciousness Explained* (*Conştiinţa explicată*)[249] din 1991, filosoful american Daniel Dennett spunea:[250]

Poziţia fundamental antiştiinţifică a dualismului este, după părerea mea, trăsătura care îl descalifică total, şi e motivul pentru care [...] adopt regula aparent dogmatică după care dualismul trebuie evitat cu orice preţ. Nu e vorba că aş avea un argument zdrobitor care să arate că dualismul, în toate formele sale, e fals sau incoerent, ci că, dat fiind felul în care se bălăceşte în mister, acce*ptarea lui înseamnă renunţare.*

Ce–i de făcut dacă respingem dualismul şi nu avem soluţie la „problema grea"? Ne-am mai aflat într-o asemenea situaţie şi cred că deja cunoaşteţi strategia de a ieşi din impas. Nu ne rămâne decât să ne acceptăm ignoranţa şi să facem câteva *presupuneri* rezonabile. Presupunem că, indiferent cum funcţionează, conştiinţa apare ca rezultat direct al proceselor neurale chimice şi fizice care au loc în creier. Experienţa noastră legată de un trandafir roşu are un *corespondent neural* – crearea unui anume set de stări chimice şi fizice,

implicând un număr de neuroni aflaţi în diferite părţi ale creierului. În termeni filosofici, asta se numeşte „materialism”.

Corespondenţe neurale

Nu aş propune ipoteza materialistă dacă n-aş avea motive întemeiate de a crede în valabilitatea ei. Creierul cântăreşte în medie circa 1,4 kilograme şi are o consistenţă gelatinoasă. E un organ delicat şi, din nefericire, se pot întâmpla o sumedenie de lucruri rele cu el. Studiind însă efectele leziunilor cerebrale asupra reacţiilor conştiente ale celor afectaţi, putem afla multe despre legăturile dintre creier şi mintea conştientă.

De pildă, victimele unui accident vascular cerebral în zona cortexului vizual primar, localizat în lobul occipital, pot *vedea orbeşte.* Ei nu mai văd efectiv obiectele sau mişcarea, şi totuşi în mod straniu par conştienţi de ele şi le pot chiar identifica foarte precis, deşi îşi închipuie că fac alegeri la întâmplare. Pacienţii în asemenea cazuri par să nu aibă experienţe legate de aceste obiecte (prin conştiinţa F), dar atunci când sunt rugaţi să acceseze informaţii despre ele şi să le comunice (prin conştiinţa A), informaţia se află acolo. Dacă cei care văd orbeşte cred că sunt orbi, însă de fapt pot să „vadă”, cei care suferă de *anosognozie vizuală* sunt de fapt orbi, dar cred că pot vedea. Ei comunică experienţe sau amintiri inventate nu pentru a minţi, ci fiindcă sunt convinşi că experienţele sau amintirile sunt reale. Cei care suferă de *prosopagnozie* sunt conştienţi de obiecte (şi în special de persoane), dar fără asocierile memoriei de scurtă sau de lungă durată. Deşi obiectele şi persoanele le sunt cunoscute, ei nu le recunosc – o dereglare prezentată minunat în cazul doctorului P din cartea lui Oliver Sacks *Omul care îşi confunda soţia cu o pălărie.* Titlul spune tot. Aceste cazuri tragice oferă importante indicii că experienţele conştiente îşi au originea în anumite zone din creier şi că sunt modificate sau diminuate odată cu vătămarea acelor zone.

În anii 1950, neurochirurgul canadian Wilder Penfield a operat peste o mie de pacienţi, între care şi sora lui. Căutând zona afectată, Penfield şi colegii săi stimulau suprafaţa creierului cu electrozi. Cum în creier nu există receptori de durere (de ce ar fi nevoie de ei acolo?), întreaga procedură putea fi efectuată doar cu anestezie locală. Pacienţii

rămâneau conștienți și spuneau chirurgilor ce simțeau. Penfield a identificat astfel zonele din creier responsabile pentru procesarea semnalelor senzoriale și cele responsabile pentru răspunsurile motorii necesare declanșării mișcărilor corporale. Aceste hărți pot fi găsite acum în orice manual de neurologie și sunt adesea reprezentate prin proiectarea unui homunculus („omuleț") pe suprafața celor două jumătăți ale cortexului cerebral, deformat astfel încât să reflecte intensitatea senzației sau a reacției provocate. Asemenea diagrame arată importanța relativă în senzație și mișcare a mâinilor (în special a degetelor), a feței (în special a buzelor) și a limbii.[251]

La stimularea diferitelor zone, uneori pacienții raportau senzații sau făceau mișcări involuntare. Când părți din lobii temporali drept și stâng erau stimulate, unii pacienți spuneau că văd și aud ceva (uneori separat, alteori concomitent). Unii mărturiseau că se declanșau gânduri, amintiri sau imagini vizuale. Unii vorbeau despre experiențe de tip oniric.

Un tratament pentru epilepticii la care apare o activitate electrică anormală într-una din emisfere este secționarea corpului calos, mănunchiul de fibre care leagă cele două emisfere. Rezultatul e un „creier divizat". De fapt, cele două jumătăți sunt încă legate prin regiunile centrale ale creierului, astfel încât pacienții își păstrează identitatea și nu suferă o pierdere a facultăților mentale, altminteri caracteristică leziunilor cerebrale. Studii asupra pacienților cu creier divizat efectuate în anii 1960 de neurobiologii americani Roger Sperry și Michael Gazzaniga au demonstrat totuși că emisferele au funcții diferite. Emisfera stângă tinde să domine în activitatea verbală, analitică și de procesare secvențială, iar cea dreaptă tinde să se specializeze în sarcini sintetice spațiale și creative.

Informația vizuală din stânga câmpului vizual – partea dreaptă a retinei – e procesată de cortexul vizual drept, și invers pentru partea dreaptă a câmpului vizual. Informația tactilă de la mâna stângă e procesată în emisfera dreaptă, și invers pentru mâna dreaptă. La un pacient dreptaci, vorbirea e controlată în emisfera stângă. Un cuvânt care îi apare unui pacient cu creier divizat în dreapta câmpului vizual, deci e procesat de emisfera stângă, este recunoscut imediat: pacientul îl poate

rosti și scrie. Dacă însă cuvântul îi apare aceluiași pacient în stânga câmpului vizual, deci e procesat de emisfera dreaptă, este recunoscut, dar cum emisferele sunt deconectate, pacientul nu-l mai poate rosti sau scrie.

Din fericire, neurologii nu mai trebuie să se bazeze pe pacienții supuși unor intervenții chirurgicale extreme. Ei au acum acces la tehnici sofisticate, cum ar fi imagistica prin rezonanță magnetică funcțională (RMNf) și tomografia prin emisie de pozitroni (TEP), care pot sonda neinvaziv, în detaliu, funcționarea creierului. Dacă ai o experiență sau te gândești la ceva, sunt stimulate una sau mai multe zone din creier. Când aceste zone se activează, ele iau glucoză și oxigen din sânge. O scanare RMNf arată unde e concentrat oxigenul, deci care zone din creier „se aprind" ca rezultat al unui anumit stimul senzorial, proces de gândire sau amintire. O scanare TEP folosește un marker radioactiv din sânge, altminteri face cam același lucru, dar cu rezoluție mai slabă. A trebuit să fac un RMN în vara anului 2013 (figura 94(a)). Imaginea nu arată cum „se aprinde" vreo parte a creierului meu (nu era un RMNf), dar vă asigur că am rămas tot timpul conștient (și m–a surprins cât de zgomotos e procedeul). M–am bucurat să văd că într-adevăr creierul îmi umple întregul craniu (lucru de care mă îndoisem în trecut).

Prin asemenea studii aflăm că, rezultat al unei lungi istorii de adaptări evolutive în care s-a folosit ce avea la dispoziție, creierul uman e mai degrabă încropit. Zonele din creier responsabile de procesarea informațiilor senzoriale de tipul celor care modelează conștiința F sunt răspândite pe mare parte din cortex (figura 94(b)). Zonele implicate în funcțiile de execuție care țin de conștiința A sunt localizate în lobii frontali.

Creierul e un organ care operează distributiv. Un timp s-a crezut că amintirile se găsesc stocate într-un anumit loc, ca „engrame" în echivalentul cerebral al memoriei cu acces aleator (RAM). Știm însă acum că nu așa stau lucrurile. Imaginea și mirosul unui trandafir roșu sunt stocate în acele zone care se ocupă cu vederea și cu simțul olfactiv, și care au fost implicate în experiența inițială a conștiinței F. Reamintirea lui presupune activarea acelorași zone din creier, deci „reexperimentarea" lui. Penfield și colegii săi n-aveau cum să–și dea

seama că alte părți ale creierului erau activate când stimulau amintirile pacienților aplicând electrozi pe anumite zone.

De fapt, amintirile nu par să se deosebească prea mult de gânduri. Psihologul britanic Alan Baddeley a propus un model al „memoriei de lucru” pe termen scurt cu subsisteme separate, care păstrează informația

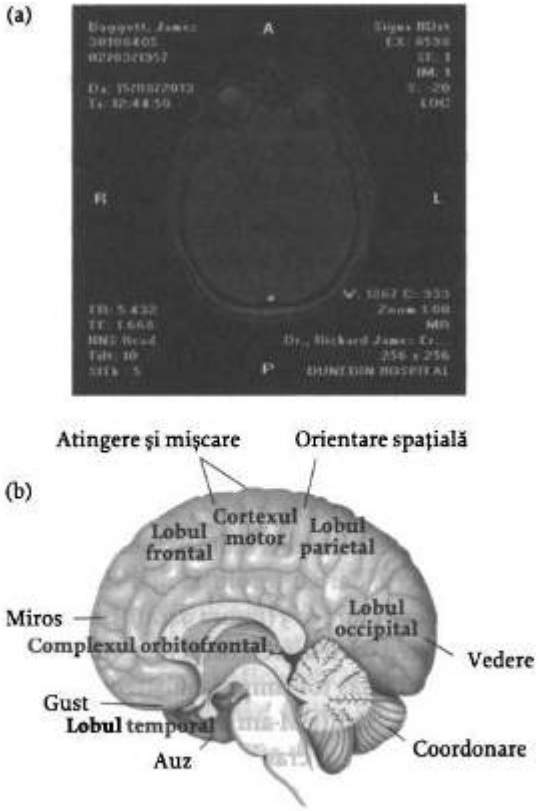


Figura 94. *În vara anului 2013 a trebuit fac un RMN, (a). Imaginea prezintă simetria bilaterală a creierului meu, cu două emisfere aproape egale, și unele detalii structurale (sistemul limbic) în centru. Neurologii au cartografiat acele părți ale cortexului cerebral implicate în percepția senzorială legată de conștiința F (b). O mare parte din cortex intervine în perceperea lumii exterioare, iar lobul frontal e implicat în procesarea la nivel înalt legată de conștiința A.*

vizual–spațială și verbală, și un fel de „centru executiv”, care coordonează și integrează această informație și recuperează amintirile. Modelul funcționează destul de bine, dar e departe de a fi optim. E mai curând ceva în genul lui Heath Robinson (sau Rube Goldberg, pentru cititorii americani), decât în genul lui Frank Lloyd Wright,[252] funcția decurgând din formă, și nu invers. Greu de crezut că ar câștiga vreun concurs de design sau de arhitectură a sistemelor.

Dar unde sunt „eu”?

Studiul pacienţilor cu leziuni cerebrale şi folosirea tehnicilor moderne le-au permis neurologilor să alcătuiască o imagine detaliată a colaborării dintre diferitele părţi ale creierului pentru a genera experienţe conştiente, dar nu pot spune deocamdată cum au loc aceste experienţe – n-au rezolvat „problema grea”. Ce putem spune atunci despre „marea sinteză” care pare să se desfăşoare în mintea mea, sinteza care îmi dă un sentiment neîntrerupt al sinelui, al ceea ce sunt? Există oare părţi din creierul meu unde simt bucurie sau tristeţe, unde îmi păstrez simţul moral, unde (cred că) îmi exercit liberul arbitru, unde înţeleg lumea şi–mi plănuiesc viitorul? Există oare părţi din creier unde aş putea să mă găsesc pe *mine însumi?* în linii mari, răspunsul e da. Este vorba de cortexul prefrontal dorsolateral.

Ştim asta din studiul pacienţilor cu leziuni în cortexul prefrontal. Un exemplu e povestea tragică din 1848 a lui Phineas Gage, care lucra la o companie de căi ferate şi se ocupa cu dinamitarea stâncilor. Într-o după–amiază de vară a suferit un accident cumplit. Făcuse o gaură într-o stâncă şi o umplea cu praf de puşcă şi nisip. Pe când „bătătorea” delicat nisipul cu o tijă de fier – operaţie de rutină, pentru el – pulberea a explodat, iar tija i-a intrat în obrazul stâng şi i-a ieşit din cap prin lobul frontal. În mod surprinzător, Gage n-a murit. Şi mai surprinzător, el a rămas conştient, vorbind coerent şi chiar glumind în timp ce colegii îl duceau la doctor. Simulările pe calculator efectuate 120 de ani mai târziu au arătat că tija ocolise regiunile din creier specializate în limbaj şi funcţia motorie, dar a afectat zone din cortexul prefrontal (figura 95). Rănile lui Gage s-au vindecat după două luni, dar el devenise o altă persoană. Leziunea cerebrală[253]

[...] i-a compromis capacitatea de planificare, de a se comporta conform regulilor sociale pe care le deprinsese şi de a lua hotărâri în avantajul supravieţuirii lui.

Gage devenise impulsiv, obraznic şi leneş, în puternic contrast cu personalitatea şi comportamentul său dinainte de accident. Şi-a pierdut slujba la căile ferate, s-a apucat de agricultură şi apărea în spectacole circ. A murit la doisprezece ani după accident.

Neurobiologul american de origine portugheză Antonio Damasio afirmă că Gage nu suferise vreo leziune care să-i diminueze capacitatea de a judeca – creierul lui putea funcționa în continuare ca o mașinărie analitică –, în schimb era „dezechilibrat”. Lipsit de controlul care îi călăuzise până atunci comportamentul, Gage nu mai putea face alegerile „corecte”. Nu mai era el însuși.

După cum am arătat mai sus, de regulă emisfera dreaptă nu poate comunica verbal sau în scris, dar un pacient cu creierul divizat, Paul S, care suferise o leziune în emisfera stângă, după un timp a reușit să–și recapete vorbirea și a învățat să scrie cu mâna stângă. După secționarea corpului calos, a putut deci comunica separat din ambele emisfere. Iată ce spune Gazzaniga:[254]

În loc să ne întrebăm dacă emisfera dreaptă [a pacientului] era suficient de puternică pentru a fi

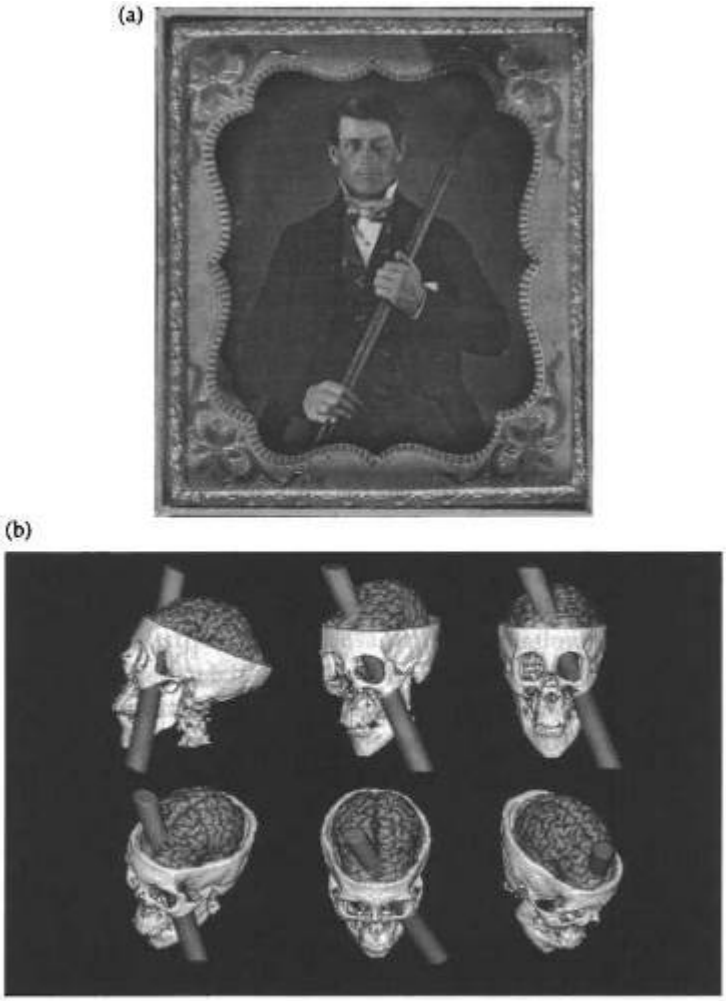


Figura 05. *Phineas Gage, care apare într-un dagherotip (a), a suferit un accident cumplit în 1848: o tijă de fier i-a intrat în obrazul stâng și i-a ieșit din cap prin lobul frontal. Simulările pe calculator efectuate 120 de ani mai târziu (b) le-au permis lui Antonio Damasio și colegilor săi să determine ce părți ale creierului fuseseră atinse. Gage a supraviețuit accidentului, dar vătămarea lobului frontal i-a modificat personalitatea.*

conștient dublată, eram acum în situația de a interoga partea dreaptă [a pacientului] cu privire la prietenie, iubire, ură și aspirații. [...] Când [pacientul] a dovedit pentru prima dată această aptitudine, studentul meu Joseph Ledoux și cu mine [...] ne-am privit unul pe altul un timp care părea o eternitate. Jumătate de creier ne vorbise despre propriile lui sentimente și opinii, iar cealaltă jumătate, cea stângă, răspunzătoare pentru limbaj, și-a suspendat temporar dominația și a urmărit cum partenerul ei tăcut își exprimă vederile.

Sentimentele și opiniile emisferei drepte a lui Paul S nu coincideau mereu cu cele ale emisferei stângi. Când Paul a fost întrebat ce ar dori

să fie, emisfera dreaptă a scris „pilot de curse”. La aceeași întrebare, emisfera stângă a scris (cu mâna sa dreaptă) „proiectant”.

Toate acestea mi se par destul de convingătoare. Neuroștiințele în forma lor modernă au apărut abia în a doua jumătate a secolului trecut, iar cunoașterea noastră a parcurs un drum foarte lung într-un timp relativ scurt. S-ar putea să nu rezolvăm niciodată „problema grea”, dar cred că vom înainta mult în demonstrația că de fapt conștiința nu e un „lucru”, ci un *proces* care are loc într-un creier dezvoltat.

Și un ultim aspect înainte de a trece mai departe. Întemeind conștiința și mintea pe activitatea neuronală din creier, trebuie să acceptăm ce decurge de aici: conștiința nu e monopolul omenirii. Pe 7 iulie 2012, un grup internațional de specialiști de prim rang în neuroștiințe s-a reunit la Universitatea Cambridge. În urma dezbaterilor, s-a căzut de acord asupra *Declarației Cambridge privind conștiința,* în care se spune:[255]

[...] numeroase dovezi arată că oamenii nu sunt singurii care posedă substraturile neurologice care generează conștiință. Animale nonumane, incluzând toate mamiferele și păsările, precum și multe alte ființe, între care caracatițele, posedă și ele aceste substraturi neurologice.

În drumul spre Marele Salt Înainte

Dacă vă conving aceste argumente, atunci veți accepta faptul că mintea și conștiința sunt un fel de funcții sau procese de „nivel înalt” ale creierului material. La începutul capitolului ne întrebam când au apărut aceste aptitudini în istoria evoluției noastre. Nici la întrebarea asta nu avem un răspuns exact. Cutia craniană ne poate oferi indicii privind dimensiunea lobilor principali, deci privind dezvoltarea creierului, dar gândurile nu se fosilizează. Putem totuși folosi informațiile disponibile pentru a construi scenarii care conțin mai mult decât un grăunte de adevăr.

Specia umană care apare în Africa acum vreo 200.000 de ani nu e binecuvântată cu un creier prea mare. Însă creierul lui *Homo sapiens* se deosebește prin faptul că are un lob frontal mai voluminos – locul unde, după cum tocmai am aflat, se vor dezvolta aptitudinile mentale de „nivel înalt” care ne definesc ca ființe umane. Mutații genetice mai vechi

din linia evolutivă a genului *Homo* au creat deja premisele anatomice pentru vorbire și au sporit posibilitățile creierului de a accede la limbaj.

Imaginea începe să se contureze. Oamenii dezvoltă limbajul, care accelerează mult formarea căilor neuronale din creier, în special a celor implicate în gândirea abstractă sau simbolică, pe care se clădește conștiința umană. Gândirea se întemeiază pe limbaj, iar apariția acestuia oferă un impuls puternic dezvoltării minții conștiente. În paralel, capacitatea de comunicare permite crearea unor grupuri și structuri sociale mai complexe. Prin importante bucle de feedback se dezvoltă un *creier social* capabil să anticipeze comportamentul altora și să-i facă față. Se făuresc tot mai multe căi neuronale, iar conștiința urcă la un nivel mai înalt. Nu e un proces liniar, și în niciun caz rapid, însă cred cu tărie că originea și evoluția timpurie a conștiinței umane e determinată de interconexiunea dintre genetică, limbaj și societate.

Procesul e lent la început, *Homo sapiens* se comportă ușor diferit de alte specii umane arhaice, folosește un set limitat de unelte primitive, poartă îmbrăcăminte rudimentară și trăiește în peșteri, în mici grupuri de vânători–culegători. În Peștera Blombos din Rezervația Naturală Blombosfontein, pe coasta Africii de Sud, la vreo 300 de kilometri est de Cape Town, s-au găsit o serie de artefacte vechi de 70.000–100.000 de ani. Printre ele se numără pietre crestate (cum ar fi Piatra Blombos, figura 96(a)), oase crestate și mărgele din scoici marine. S-ar putea ca acestea să fie primele reprezentări abstracte făcute de oameni.

Se pare că ajungem în fine la un punct critic acum 40.000–50.000 de ani, deși unii oameni de știință nu sunt convinși.[256] Acesta e *Marele Salt înainte* sau „revoluția umană", o înflorire a inventivității și creativității implicând tranziția la ceea ce numim *modernitate comportamentală.* După tranziție avem de-a face cu unelte mult mai sofisticate („Epoca târzie a pietrei" în Africa și „Paleoliticul superior" în Europa și vestul Asiei), cum ar fi ace din os folosite la coaserea îmbrăcămintii. În loc să se mulțumească cu unelte făurite din ce aveau la îndemână, acești oameni moderni importă unelte făurite din materiale aflate uneori la distanțe de sute de kilometri, pesemne prin negoț și rețele complexe de schimb. Vedem începuturile unei culturi pe de-a-ntregul umane în sculpturile fin lucrate, podoabele, instrumentele muzicale și picturile

rupestre, cum sunt cele din Peștera Chauvet, lângă Avignon, vechi de 35.000 de ani (figura 96(b)). Se bănuiește că aceste peșteri nu slujeau drept galerii de artă, ci erau folosite pentru ritualuri de inițiere.

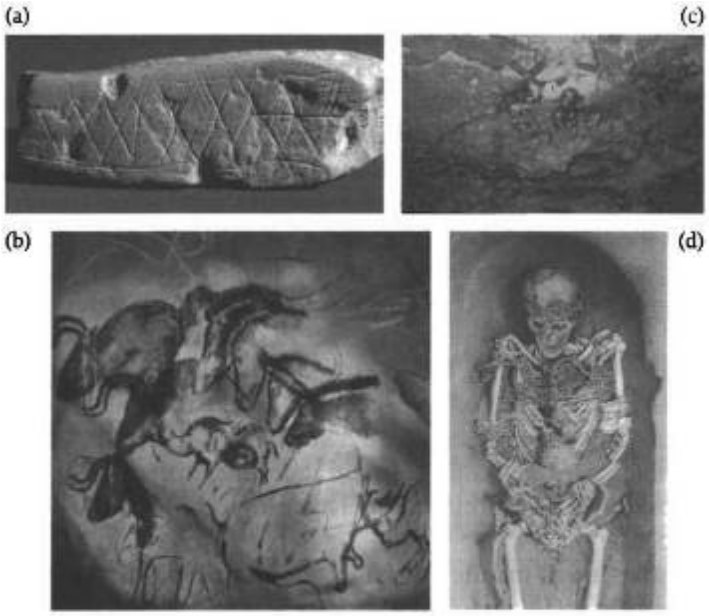


Figura 96. *(a) Semnele crestate în limonit (un minereu bogat în fier) se crede că sunt primele exemple de exprimare abstractă. Au fost descoperite în Peștera Blombos din Africa de Sud și au o vechime de 70 000–100 000 de ani. După Marele Salt Înainte, petrecut în urmă cu 40 000–50 000 de ani, asemenea gen de expresie își atinge apogeul, de pildă în picturile din Peștera Chauvet din sudul Franței (b), vechi de 35 000 de ani. Deși majoritatea exemplelor pentru această creativitate umană înfloritoare se găsesc în Europa, au fost descoperite unele și în Asia, cum sunt urmele de mâini dintr-un sistem de peșteri din Sulawesi, Indonezia (c). Înmormântările rituale de la Sungir, Rusia, vechi de 28 000–30 000 de ani, demonstrează creșterea rapidă a abilității meșteșugărești (d). Acest bărbat adult a fost îngropat în haine decorate cu 3 000 de mărgele.*

Multă vreme s-a crezut că Marele Salt înainte ține strict de dezvoltarea europeană, ceea ce reflecta, după unii paleoantropologi, înclinații europocentriste în interpretarea datelor arheologice. Antropologii americani Sally McBrearty and Alison Brooks au publicat în anul 2000 un articol prin care încercau să pună lucrurile la punct.[257] Cert e însă că primele exemple de creativitate umană veneau din Europa. Situația s-a schimbat în octombrie 2014, odată cu publicarea în revista *Nature* a unui articol despre picturile descoperite într-un sistem de peșteri din insula indoneziană Sulawesi.[258] Printre acestea se numără douăsprezece urme de mâini umane, produse prin împrăștierea unui pigment umed peste mâna lipită de peretele peșterii (figura 96(c)), și două picturi animaliere. Cea mai veche urmă datează de cel puțin

39.900 de ani, dinaintea urmelor asemănătoare descoperite în Europa. De asemenea, una din picturile animaliere e veche de cel puțin 35.400 de ani, fiind primul exemplu de acest gen.

Găsim dovezi ale unor ritualuri specific umane la Sungir, la vreo 200 de kilometri est de Moscova, unde o echipă de arheologi au dezgropat în anii 1950 două morminte. Avem de-a face cu înmormântări rituale: un bărbatul adult – fără îndoială, un fel de șef – e împodobit cu aproximativ 3000 de mărgele din fildeș, perforate, care se crede că au fost cusute pe îmbrăcămintea lui (figura 96(d)). Celălalt mormânt conține rămășițele a doi copii, un băiat și o fată, despre care se crede că au fost sacrificați. Copiii sunt și ei împodobiți, fiecare cu aproximativ 5000 de mărgele. Se estimează că lucrul la aceste mărgele va fi durat circa 10.000 de ore. Băiatul purta pesemne o centură din colți de vulpe arctică perforați, iar ambii copii aveau un ac de fildeș în dreptul gâtului, folosit probabil la prinderea unei mantii. Situl e vechi de 28.000–30.000 de ani.

Marele Salt înainte n-ar fi fost posibil fără adaptări genetice care să permită dezvoltarea vorbirii, limbajului și structurilor sociale complexe. Să le analizăm deci pe fiecare în parte.

$FOXP_2$ și instinctul limbajului

Pentru ca oamenii să vorbească și să folosească limbajul există câteva condiții anatomice pe care evoluția trebuie să le asigure. Articularea sunetelor necesită modificări anatomice prin care laringele („cutia vocală") să coboare, iar limba să–și schimbe forma și să coboare în faringe, în partea din spate a gâtului, creându-se astfel o cale liberă numită „tractul vocal supralaringian". Gâtul se alungește pentru a adăposti laringele și a face posibilă înghițirea. Există însă și un revers al medaliei, calea liberă riscă să se blocheze cu mâncare, ceea ce poate duce la o sufocare letală.

Lăsând deoparte anatomia, limbajul nu e posibil fără structurile neurale care să-l susțină. Folosirea limbajului presupune capacitatea de a anticipa ce urmează să fie vocalizat, de a planifica și a mișca în mod corespunzător buzele și limba:[259]

Vorbitorii umani planifică. Când rostești cuvântul *„too"*, buzele „se rotunjesc" (ies în afară și se îngustează), anticipând vocala rotunjită „u".

Buzele nu se rotunjesc la începutul cuvântului *„tea”,* pentru că vocala care urmează nu e rotunjită.

În 1998, Simon Fisher, Anthony Monaco și colegii lor de la Oxford au găsit indicii importante privind bazele genetice ale limbajului. Ei au studiat o familie de 30 de persoane din Londra („familia KE”), intrată în atenția comunității științifice în 1990 grație Myrnei Gopnik, profesor de lingvistică la Universitatea McGill. Aproximativ jumătate din membrii familiei suferă de o tulburare de vorbire numită dispraxie verbală de dezvoltare, care îi împiedică să planifice și să execute mișcările necesare limbajului corect gramatical. Geneticienii au descoperit că problema e legată de o mutație a genei $FOXP_2$ care se află pe cromozomul 7 și codifică o proteină numită Forkhead–Box P_2, alcătuită din peste 700 de aminoacizi. În mod normal, poziția 553 din această secvență e ocupată de aminoacidul arginină, dar la membrii familiei KE care prezintă tulburări de vorbire, poziția 553 e ocupată de histidină. Este incredibil ce poate face un singur aminoacid plasat greșit într-o serie de peste 700.

$FOXP_2$ nu e „gena limbajului” sau „gena gramaticii” (așa cum se spune uneori în presă). S-ar părea că $FOXP_2$ e o genă de comandă și control care, la fel ca genele HOX, afectează exprimarea a sute de alte gene, mai ales în perioada de dezvoltare a embrionului. Unul dintre motivele pentru care variația unui singur aminoacid provoacă asemenea efecte e faptul că poziția 553 e aproape de acea parte a proteinei care se leagă de alți cromozomi și are o importanță fundamentală în reglarea altor gene. Gena $FOXP_2$ nu apare numai la oameni, variații ale ei sunt larg răspândite la mamifere. Gena $FOXP_2$ de la cimpanzei produce o proteină care se deosebește de cea umană doar prin *doi* aminoacizi. La șoareci, diferența e de trei aminoacizi, iar la cintezele australiene de șapte. Din câte știm, neandertalienii și denisovanii aveau gene $FOXP_2$ *identice* cu ale oamenilor moderni.

Prezența lui $FOXP_2$ nu conduce automat la dezvoltarea limbajului, e o condiție necesară, dar nu și suficientă. (Cum spunea Steven Pinker în *The Language Instinct*, dacă scoți delcoul, mașina se oprește, ceea ce nu înseamnă însă că mașina e controlată de delco). S-ar părea că $FOXP_2$ are

un rol mai larg, oferind condiţii favorabile apariţiei limbajului (între altele). Ea încurajează creşterea conexiunilor dintre neuroni, care, în combinaţie cu un lob frontal mai mare şi modificările anatomice necesare vorbirii, creează instinctul limbajului la om.

Puteau vorbi neandertalienii? Părerile sunt împărţite. În cartea sa *The Singing Neanderthals*, publicată în 2005, arheologul britanic Steve Mithen afirmă că, deşi par să fi avut structurile anatomice necesare vorbirii, neandertalienilor le lipsea „fluiditatea cognitivă" necesară gândirii simbolice şi limbajului.[260] Aveau pesemne unele ingrediente, dar nu pe toate. Mithen crede că neandertalienii au dezvoltat totuşi un fel comunicare „lălăită", pe care o numeşte „Hmmmmm".

Alte minți, intenționalitate și creierul social

Descartes părea convins că e o fiinţă cugetătoare dotată cu o minte conştientă. Cum rămâne însă cu ceilalţi? Cei care pretind că pot citi gândurile nu le citesc în măsură mai mare decât e un scamator capabil de magie reală. Minţile noastre sunt modelate de experienţe personale şi subiective, şi rămân închise în capetele noastre. Dacă n-am acces la alte minţi, de unde ştiu că ele funcţionează la fel ca mintea mea? Ba, mai mult, semeni cu un om, te comporţi ca un om, dar pentru mine ai putea fi un „zombi filosofic", lipsit de experienţe conştiente şi de minte. Filosofii numesc asta „problema altor minţi".

Majoritatea oamenilor (care nu sunt filosofi) nu–şi bat capul cu aşa ceva. Folosim o mulţime de semnale verbale şi nonverbale pentru a deduce că alţii au într-adevăr minţi şi că ele funcţionează în multe privinţe asemănător cu mintea noastră. De la o vârstă fragedă învăţăm (în mare măsură inconştient) să-i înţelegem pe ceilalţi, formându–ne propria noastră *teorie a minţii.*

Când gândim, ne gândim întotdeauna *la* ceva – ceea ce filosofii numesc *intenţionalitate.* Asta nu înseamnă doar că am intenţia să fac anumite lucruri, de pildă să cumpăr o casă sau să fur o maşină. Intenţionalitatea e capacitatea unei minţi conştiente de a–şi reprezenta obiecte fizice, persoane şi situaţii (reale sau imaginare), şi e organizată ierarhic. Intenţionalitatea de ordinul întâi este conştiinţa de sine. Intenţionalitatea de ordinul doi e reprezentarea minţii altuia – „Ştiu la

ce te gândești". Ordinele superioare devin tot mai complexe, iar o afirmație tipică de ordinul cinci ar fi: „Cred că bănuiești că A vrea ca B să creadă că C are de gând să fure o mașină." Copiii își formează o teorie completă a minții pe la cinci ani, iar adulții pot opera fără probleme până la ordinul al cincilea sau al șaselea.[261]

Cum funcționează asta? Există mai multe variante, dar cel mai probabil mecanism implică simularea altor minți în mintea noastră. Ne punem în locul celui al cărui comportament îl urmărim, „vedem lumea cu ochii lui" și simulăm ce este probabil să se petreacă în mintea lui pe baza a ceea ce ar fi probabil să se petreacă în mintea noastră în aceleași împrejurări. Nu e un instinct cu care ne naștem, ci se dezvoltă din copilărie până la maturitate. Nu–i nevoie să cunoaștem de multă vreme un om pentru a ne închipui ce simte și ce gândește, e suficient să credem (sau să presupunem) că mintea lui funcționează cam la fel ca a noastră. Același lucru se aplică și cuiva pe care nu l-am întâlnit niciodată, ba chiar și unui personaj fictiv (nu neapărat uman) – o facem de fiecare dată când citim un roman.

Nu veți fi surprinși să aflați că și pentru asta există o bază neuronală. La sfârșitul anilor 1990, o echipă de neurologi italieni condusă de Giacomo Rizzolatti a găsit dovezi privind existența *neuronilor oglindă* la macaci. S-a descoperit apoi că și oamenii au neuroni oglindă, distribuiți în mai multe zone din creier. Aceștia sunt activi atunci când observăm pe cineva că face ceva, că reacționează la ceva sau exprimă emoții, iar ei oglindesc efectiv activitatea neuronală din creierul celui pe care îl privim.

Cu ajutorul neuronilor oglindă imităm subconștient în creierul nostru o acțiune observată, fără ca noi să efectuăm de fapt acea acțiune. A fost identificat un mecanism care inhibă neuronii răspunzători de mișcarea corpului, așa încât nu ajungem să-l maimuțărim pe subiectul observat (dar vă provoc să priviți scena de tortură stomatologică din filmul *Marathon Man* al lui John Schlesinger fără să tresăriți). Capacitatea noastră de a ne pune în locul altei persoane – a avea *empatie* – e adânc înrădăcinată în creier. Psihologul evoluționist Robin Dunbar a adunat laolaltă toate acestea, și multe altele, în *ipoteza creierului social:*[262]

Este general acceptat faptul că forța motrice în evoluția creierului primatelor (și al tuturor mamiferelor și păsărilor, pesemne) e dezvoltarea unor forme complexe de sociabilitate. Cu toate că și alte aspecte ale comportamentului (în special inventivitatea ecologică) sunt corelate cu dimensiunea creierului, acestea sunt mai degrabă consecințe ale unui creier mare decât cauza evoluției lui.

Este o teorie complexă, construită din numeroase observații, de la date paleontologice la rezultatele experimentelor din neuro–științe. Imagistica neuronală arată că atunci când apelăm la o teorie a minții pentru a avea de-a face cu alții, folosim părți din cortexul prefrontal și două zone din lobul temporal. Cu cât e mai înalt nivelul de intenționalitate, cu atât e nevoie de o capacitate neuronală mai mare, în special în complexul orbito–frontal. Cimpanzeii și urangutanii pot face față nivelului doi de intenționalitate, dar nu pot ajunge mai sus, fiindcă le lipsește capacitatea neuronală.

Cum funcționează teoria? E tentant să ne închipuim că *vânătoarea* joacă aici rolul central. La urma urmei, pentru acești primi oameni moderni succesul la vânătoare va face diferența în ce privește supraviețuirea. Orice element care sporește eficacitatea (o pradă mai mare înseamnă mai multe calorii) și randamentul (să cheltuiești mai puține calorii pentru a doborî o pradă mai mare, fără să fii rănit sau ucis) va fi avantajos. Limbajul și sociabilitatea, care permit unui grup de vânători să dobândească încredere, să anticipeze, să planifice și să comunice, sunt esențiale.

Nu vreau să subestimez importanța limbajului și sociabilității în vânătoare, dar trebuie observat că multe specii de animale (hienele, de pildă) vânează excelent în haită, își coordonează acțiunile fără limbaj și doboară prăzi mari. Avem motive întemeiate să credem că neandertalienii erau și ei vânători iscusiți, așa că n-ar trebui să ne lăsăm orbiți de soarta lor și să uităm că au supraviețuit pe Pământ 300.000 de ani.

Dunbar și colegii lui susțin că, la oamenii moderni, forța motrice a limbajului și cea a sociabilității sunt diferite. Limbajul ne permite să comunicăm și să schimbăm informații. Despre ce? Putem bănui că aceste informații vizau aspecte importante ale mediului fizic:

localizarea unei surse de apă potabilă sau a unui prădător periculos, ori cea mai bună metodă de a doborî un mamut. Limbajul ne permite de asemenea să „socializăm", să construim relaţii prin „bârfă". Ne permite să facem declaraţii, pesemne foarte importante într-o societate primitivă de vânători–culegători: „Sunt plecat la vânătoare pentru câteva zile. Ea este a mea, aşa că nimeni să nu se atingă de ea până mă întorc". Un alt argument sugerează că limbajul e o formă de „etalare" masculină, deci joacă un rol important în selecţia sexuală. Probabil că, aşa cum spunea Stephen Fry într-o reclamă TV la berea Heineken, femeile au fost mereu atrase de un barman care vorbeşte calm.

Există destule dovezi că schimbul de informaţii despre lumea fizică apare abia după ce au fost stabilite legăturile sociale necesare. Aspectele personale au deseori întâietate asupra celor practice. La maimuţe şi primate legăturile din comunitate sunt obţinute prin *grooming*[263] social. Asta ia un timp, iar Dunbar şi colegii lui au construit câteva modele relativ simple pentru a estima timpul care e consumat pentru căutarea hranei, deplasare şi repaus forţat (digestie, somn şi evitarea supraîncălzirii). Timpul rămas e disponibil pentru *grooming*. Luând în calcul timpul mediu necesar unei „sesiuni" individuale (unu-la–unu) de *grooming*, rezultă dimensiunea naturală a unei comunităţi care poate fi legată pe această cale. Pentru o comunitate de cimpanzei, dimensiunea medie este de aproximativ 55 de indivizi.

Limbajul înlesneşte însă legarea prin forme de socializare de tipul unul-la–mai mulţi, ca atunci când spui poveşti sau bancuri. Aceste prime poveşti e probabil să se refere la originea lumii fizice şi a oamenilor din comunitate, invocând zei şi fiinţe mistice în încercarea de a explica vicisitudinile vieţii sau de a–i ajuta pe membrii comunităţii să se împace cu ele. Ritualurile şamanice, implicând călătorii în stare de transă indusă în lumea spiritelor, stârnesc emoţii puternice şi făuresc un set de credinţe împărtăşite, liantul ce menţine laolaltă comunitatea, stabilind identitatea ei colectivă şi dând un sens vieţii.

Prin folosirea limbajului şi antrenarea circuitelor neurale implicate în creierul social, primii oamenii moderni pot alcătui comunităţi mai mari. Limita dimensiunii comunităţii e acum dată doar de capacităţile neurale ale membrilor ei. Extrapolând relaţiile dintre dimensiunea

grupului social şi raportul dintre mărimea lobului frontal şi cea a creierului subcortical la primate, Dunbar estimează că dimensiunea naturală maximă a unui grup de oameni moderni este de circa 150 de membri – „numărul lui Dunbar". Desigur, trăim azi în comunităţi mult mai mari sau chiar în oraşe cu milioane de locuitori, dar pentru Dunbar „comunitate" înseamnă altceva. Trăim şi muncim alături de mulţi oameni, dar pe câţi dintre ei îi cunoaştem cu *adevărat* (şi ne pasă de ei)? câţi dintre ei ne sunt rude sau prieteni (fie şi prieteni pe Facebook)? Şi câţi dintre ei ne sunt doar cunoscuţi, fără să avem legături cu ei? Au fost studiate diferite tipuri de comunităţi – vechi şi moderne –, iar numărul 150 apare mereu.

Iată câteva exemple. Un studiu privind lungimea listelor de distribuire a felicitărilor de Crăciun a condus la un număr mediu de 154 de destinatari. Satele din *Domesday Book*[264] au în medie 150 de locuitori. Dimensiunea ideală a unei congregaţii, recomandată de Biserica Anglicană, este de 200 de membri. Compania americană W.L. Gore and Associates, Inc. (cunoscută pentru materialul Gore–Tex) are vreo 10.000 de angajaţi, dar construieşte fabrici pentru doar 150, pe baza observaţiei că atunci când ai în subordine un număr mai mare de angajaţi „lucrurile se încurcă". „Lumea mă întreabă cum planificăm pe termen lung", spunea Bob Hen, din conducerea companiei „iar eu răspund că e simplu, facem 150 de locuri de parcare, iar când oamenii încep să parcheze pe iarbă, ştim că e momentul să construim o nouă fabrică."[265]

Crearea unor comunităţi puternice, stabile social, joacă un rol important. Spre sfârşitul Pleistocenului, când gheţarii avansează, oamenii moderni beneficiază nu numai de avantajele invenţiilor (unelte şi îmbrăcăminte cusută), dar şi de sprijinul infrastructurii bazate pe comunităţi sociale – comunitatea lor şi comunităţile vecine cu care fac troc. Ei rezistă mai bine pe o planetă care poate fi uneori neprietenoasă şi necruţătoare.

Încă mai evoluăm?

Bănuiesc că răspunsul e: de ce nu? Evoluţia operează prin mutaţii aleatorii care creează noi gene. Ele sunt probabil variante uşor diferite ale genelor existente, dar aşa cum am văzut în cazul lui FOXP2, o

singură nucleotidă modificată plasând un singur aminoacid diferit în proteina rezultată poate avea importante consecințe biologice. Noile gene pot fi avantajoase, neutre sau dăunătoare. Reproducerea în cadrul unei populații și între populații face ca noile gene să „curgă". Capacitatea de supraviețuire a acestor gene în genomul uman depinde de mai mulți factori. Evident, dacă sunt atât de dăunătoare încât să-i împiedice pe purtătorii lor să le transmită de la o generație la alta, vor fi imediat eliminate. Eșantionarea aleatorie a genelor în reproducerea sexuată poate de asemenea elimina sau accentua noi gene – fenomen numit „derivă genetică".

Un exemplu de evoluție umană recentă se leagă de intoleranța la lactoză. Lactoza e o glucidă din lapte, iar laptele uman are o concentrație ridicată de lactoză (circa 9%). Pentru a o digera e nevoie de o enzimă numită lactază, produsă imediat după naștere. Când însă copilul e înțărcat, gena care codifică enzima se dezactivează, fiindcă nu mai e nevoie de ea. Majoritatea populațiilor din Africa subsahariană, sud–estul Asiei și în special China suferă la maturitate de intoleranță la lactoză, ceea ce nu e cazul majorității europenilor și americanilor de origine europeană. De ce? Răspunsul e foarte simplu. Vânătorii–culegători s-au răspândit în Europa și în restul lumii în comunități de circa 150 de oameni, după cum am văzut. Aceasta e modul de viață predominant în preistoria umană. Apoi, pe la începutul Holocenului, acum vreo 12.000 de ani, comunitățile din diverse părți ale lumii au început să se sedentarizeze, descoperind posibilitatea *agriculturii.*

Pare ușor, dar nu toate consecințele sunt pozitive. Comunitățile stabile geografic sunt mai vulnerabile, în special față de invadatori. Cum „unde–s mulți, puterea crește", dimensiunea așezărilor sporește rapid, dincolo de limita confortabilă a celor 150 de locuitori, ceea ce creează tensiuni sociale care trebuie controlate. Producția de hrană devine mai predictibilă (deși depinde uneori de capriciile climei) și se construiesc depozite de hrană pentru perioadele cu recolte sărace. Tranziția la agricultură schimbă însă radical dieta. Consumul de glucide crește, iar cel de proteine și vitamine scade. Dunbar spune:[266]

Oamenii așezărilor neolitice erau mai scunzi decât contemporanii lor vânători–culegători (semn de dietă necorespunzătoare), iar oasele lor

trădează penuria alimentară. Aportul energetic al hranei obținute din agricultură, în trecut și în prezent, e într-adevăr mult mai mic decât cel al hranei vânătorilor–culegători.

Domesticirea bovinelor are loc în Europa în urmă cu 5000–10.000 de ani și îmbunătățește mult dieta agricolă (deși carnea rămâne încă un lux). Produsele lactate conțin însă lactoză, iar oamenii au intoleranță la lactoză. Cu vreo 8000 de ani în urmă se crede că a apărut o mutație în gena care controlează enzima lactază, făcând–o să rămână activă și la maturitate. Aceste presiuni alimentare încurajează selecția genei mutante, care se răspândește rapid în populația europeană.

Să considerăm alt exemplu. După cum am văzut în capitolul 9, o mutație petrecută acum 6000–10.000 de ani în gena $HERC_2$ afectează exprimarea genei adiacente OCA_2, schimbând culoarea ochilor din căprui în albastru (vezi nota de subsol de la începutul capitolului 9). Dacă ne uităm la incidența ochilor albaștri la populațiile din Europa de azi, găsim că ei sunt cei mai răspândiți în nordul Europei, mai ales în regiunea baltică. În cartea lor *The 10.000 Year Explosion*, antropologii americani Gregory Cochran și Henry Harpending susțin că mutația a avut loc acum 6000 de ani într-un sat din Lituania (ipoteza cea mai plauzibilă, pe baza datelor disponibile). Transmiterea ei la populațiile europene și nord–africane e explicată printr-o istorie complicată: vreme de câteva secole războinicii vandali au cutreierat Europa, jefuind Roma în 455, iar apoi în secolele XVI–XIX raidurile corsarilor au propagat iarăși gena mutantă.

Probabil că cele mai clare semne privind continuarea evoluției umane sunt cele legate de micile adaptări la condițiile climatice locale. Expunerea la lumina solară tropicală favorizează selecția genelor care susțin producerea melaninei, un pigment care întunecă pielea și oferă oarece protecție împotriva radiației ultraviolete. Este de presupus că primii oameni moderni care au migrat din Africa aveau pielea de culoare închisă. Din păcate, în afară de rolul protector, melanina inhibă producerea vitaminei D, ceea ce nu–i o problemă acolo unde există destulă lumină solară, dar când oamenii moderni ocupă zonele reci din Europa și estul Asiei, unde Soarele strălucește mai puțin, ei se confruntă cu probleme provocate de lipsa vitaminei D (rahitism infantil și alte boli

de oase), care se găsește în puține alimente – vitamina D_2 în ciuperci și lucernă, iar vitamina în pești precum somonul și tonul. Și în acest caz, mutațiile unei singure nucleotide din genele implicate în producerea melaninei (cum e gena $SLC_{24}A_5$, aflată pe brațul lung al cromozomului 15) reduc pigmentarea și restabilesc producerea vitaminei D. Se crede că aceste mutații apar în Europa acum 11.000–19.000 de ani.[267] Dacă e adevărat, atunci strămoșii europenilor moderni (și ai americanilor de origine europeană) au avut pielea de culoare închisă vreme de vreo 30.000 de ani, dublul perioadei scurse de când au pielea de culoare deschisă.

Genetica ne modelează destinul. Folosim limbajul și creierul social pentru a făuri comunități puternice, întemeiate pe un ansamblu comun de credințe, care devin în timp crezuri religioase și valori culturale larg împărtășite. Limbajul susține cultura, iar apariția dialectelor sau a variațiilor lingvistice locale întărește sentimentul de identitate comunitară. Poate că alte comunități ajung să aibă aceleași credințe și valori, dar vor rămâne oricum diferite. A gândi în termeni de „noi" și „ei" nu e doar inevitabil, ci poate avea și avantajul de a ne oferi un un atribut definitor.

Mutațiile unei singure nucleotide în câteva gene sunt amplificate de presiunile selecției în favoarea adaptărilor la climatul local. Diferențele de culoare a pielii, formă a ochilor și combinații de culoare la ochi și la păr sunt absolut banale în povestea evoluției umane, dar se întâmplă că se află la suprafață și sunt foarte vizibile. Aceste diferențe rasiale alimentează polarizarea accentuată „noi"–„ei". Cultura, religia și rasa formează un amestec extrem de volatil. Să mai adăugăm ceva lăcomie, sete de putere și grandomanie. Restul, cum se spune, e istorie.

Epilog

Aici se încheie povestea noastră. V–am avertizat în prefață cu privire la natura cunoașterii științifice. Aplicând principiul copernican, scoțându–ne din calcul și privind obiectiv lumea din jur, ne apropiem de un adevăr despre creație eliberat de prejudecățile noastre umane. Descoperim că suntem un accident, o notă de subsol într-o anexă a cosmosului. Povestea creației potrivit științei moderne nu ne hrănește

iluziile. Desfășurarea istoriei universului nu conduce în chip inevitabil la *Homo sapiens.*

Date fiind setul de condiții inițiale, amestecul particular de energie întunecată, materie întunecată și materie barionică, împreună cu amprenta fluctuațiilor cuantice amplificate de inflația cosmică, evoluția spațiului, timpului și energiei pentru a se ajunge la galaxii, stele, iar în cele din urmă la stele din generația a treia însoțite de sisteme planetare, pare în întregime predictibilă și inevitabilă conform teoriilor în vigoare din fizică și chimie. Putem merge și mai departe. E oarecum inevitabilă existența unor planete care orbitează în „zona locuibilă" a stelei lor, înzestrate cu apă lichidă și materii prime potrivite pentru apariția vieții.

Dacă acceptăm că viața este un „imperativ cosmic", atunci acceptăm că, cel puțin sub forma ei simplă, unicelulară, viața e o consecință inevitabilă a chimiei de pe o planetă luminată, caldă, umedă și locuibilă. Prin mecanismele oarbe ale evoluției, viața se răspândește inevitabil și umple spațiul ecologic disponibil. Am putea fi tentați să acceptăm caracterul oarecum inevitabil al endosimbiozei și al evoluției organismelor pluricelulare, când condițiile permit vieții să devină tot mai complexă.

Dar nu găsim nimic inevitabil în călătoria de 500 de milioane de ani care ne duce de la *Charnia*, *Dickinsonia* sau fauna cambriană la *Homo sapiens.* Căci e o călătorie plină de cruzimi și șanse impredictibile. Radiațiile evolutive ale mamiferelor (apoi ale primatelor și oamenilor) n-ar fi fost posibile fără precedentele extincții în masă. Acestea sunt rezultatul interacțiunilor complexe dintre mișcările continentelor, oceane și atmosferă, iar în cel puțin un caz intervine din pură întâmplare un asteroid aflat în locul potrivit la momentul potrivit.

Pentru ca noi să fim azi aici, au trebuit mai întâi să dispară dinozaurii. Nu e greu să ne închipuim scenarii alternative în care asteroidul și-ar fi ratat de puțin ținta sau vulcanii n-ar fi erupt, iar noi n-am fi existat. Și chiar dacă peisajul ecologic ar fi fost golit pentru a ne face loc, evoluția ar fi putut urma multe căi, dintre care puține duc la omul modern. Fapt este că nu ne aflăm în centrul poveștii, și e greu să nu te simți umil în fața acestei perspective.

Unii vor respinge ce ne spune despre noi această poveste a creației, crezând că trebuie să jucăm un rol mai important, că viața noastră înseamnă mai mult, că ne aflăm aici pentru un scop. Prin însăși natura sa, știința nu ne poate oferi certitudini, și există (vor exista mereu) goluri în cunoașterea și înțelegerea științifică, goluri care îi vor consola oarecum pe cei aflați în căutarea unui scop și a unui sens.

Suntem încă departe de o teorie științifică solidă care să ne spună de ce universul nostru „a început" cu acest set de condiții inițiale pe care e clar că-l posedă.[268] S-ar putea să nu avem niciodată o asemenea teorie. De asemenea, nu există deocamdată un „model standard" pentru apariția vieții, iar viața (și aici nu mă refer la ansamblul mecanismelor biofizice și biochimice pe care se bazează) pare o „forță" misterioasă. Conștiința rămâne și ea dincolo de înțelegerea noastră. Eu sunt totuși optimist și cred că viața și conștiința își vor dezvălui într-o bună zi cel puțin unele dintre secretele lor.

Cred că mesajul poveștii științifice a creației este că ne aflăm aici grație unor împrejurări istorice extraordinare și a unui imens noroc. Puteți face speculații pe seama golurilor din cunoaștere, dacă țineți neapărat, dar e mai probabil să nu existe niciun scop în structura și natura lumii fizice: suntem produsul ei secundar accidental, nu rațiunea ei de a fi.

Scopul și semnificația sunt invenții umane, și trebuie să le căutăm *înăuntru*, nu afară, folosind creierul nostru social. Nu suntem privilegiați în sensul că totul a fost creat de dragul nostru, dar faptul că ne aflăm aici acum e un privilegiu extraordinar. Sarcina noastră este, și fost dintotdeauna, să ne dăm seama ce avem de făcut cu noi înșine.

Dacă apariția vieții inteligente pe Pământ a fost rezultatul unui accident, iar nu al unui plan, ce ne spune asta despre posibilitatea vieții inteligente altundeva în univers? Bănuiesc că unii oameni de știință au trăit multă vreme cu iluzia că evoluția e o forță motrice irezistibilă care conduce la forme de viață tot mai complexe, iar în cele din urmă la inteligența de tip uman.[269] Dacă interpretez corect povestea creației, atunci e foarte greu să considerăm inevitabilă dezvoltarea inteligenței umane.

Nu avem nicio dovadă privind viaţa extraterestră inteligentă. Eu n-aş exclude neapărat posibilitatea ei (absenţa dovezii nu e dovada absenţei), dar cred că va fi greu de găsit, odată ce căutarea se bazează mai curând pe credinţă decât pe vreo concluzie ştiinţifică.

Am încheiat povestea cu originea conştiinţei umane, însă desigur nu acesta e sfârşitul. Cei mai mulţi dintre cititori cunosc în linii mari istoria omenirii – de la primele aşezări neolitice apărute acum vreo 11.000 de ani, ascensiunea (şi declinul) primelor oraşe, oraşe–stat şi imperii, întemeierea religiilor lumii, până la inventarea metodei ştiinţifice, revoluţia industrială şi naşterea lumii moderne.[270]

Ca populaţie umană ne obişnuim tot mai mult cu schimbările rapide şi uneori copleşitoare. Ne obişnuim cu apariţia şi dispariţia creaţiilor umane, cum sunt clădirile şi instituţiile, iar noţiunea de „progres" ne–a modelat peisajul fizic şi social. Pe măsură ce îmbătrânim însă, căpătăm un sentiment al perenităţii şi ne ataşăm de peisajul natural, de munţi, câmpii şi râuri, de oceane şi de cer, de universul stelelor vizibile. Ştim că toate acestea sunt supuse schimbării, dar dacă nu cumva se petrece o catastrofă, pentru noi schimbarea e imperceptibilă.

Povestea ştiinţifică a creaţiei ne duce mult dincolo de limitele percepţiei noastre nemijlocite. Ne deschide ochii asupra unor adevăruri măreţe. Lăsând la o parte câteva goluri din înţelegerea noastră, ne permite să răspundem la majoritatea „marilor întrebări". Cunoaştem acum natura lumii materiale şi ştim cum funcţionează. Ştim ce e universul şi cum s-a format, deşi pentru perioade mai vechi de o bilionime de secundă de la crearea lui suntem obligaţi să facem speculaţii. Ştim ce e viaţa, sau cel puţin cum se manifestă ea, deşi e greu să cădem de acord asupra definiţiei ei. Ştim de unde venim şi, în linii mari, cum am evoluat. Ştim cum şi de ce gândim, şi ce înseamnă să fii om. Şi ştim cum am ajuns să ştim.

Rămân o mulţime de mistere şi mai sunt multe de aflat. Dacă ar fi să plasăm apariţia ştiinţei în acea „zi a creaţiei" de 24 de ore, pare rezonabil să conchidem că apelăm la metodologia ştiinţifică pentru a cerceta originea universului şi a noastră doar de trei miimi de secundă. Abia am început.

Anexă

Puterile lui zece

Povestea ştiinţifică a creaţiei implică numere năucitor de mari sau de mici. Pentru a nu scrie prea multe cifre, oamenii de ştiinţă le exprimă folosind puterile lui zece. Dacă nu cunoaşteţi metoda, tabelele de mai jos vă pot fi de ajutor.

Tabelul 3. Puterile pozitive ale lui zece

Număr	Nume	Putere a lui zece	Prefix	Simbol
	Unu	10^0		
10	Zece	10^1	deca	da
100	O sută	10^2	hecto	h
1000	O mie	10^3	Kilo	K
1.000.000	Un milion	10^6	mega	M
1.000.000.000	Un miliard	10^9	giga	G
1.000.000.000.000	Un bilion	10^{12}	terra	T

Viteza luminii, c, este de 299.792.458 metri pe secundă, şi se poate scrie ca 299,792458 milioane de metri pe secundă sau 2,99792458x10^8 metri pe secundă.

Tabelul 4. Puterile negative ale lui zece

Număr	Nume	Putere a lui zece	Prefix	Simbol
0.1	Zecime	10^{-1}	deci	d
0.01	Sutime	10^{-2}	centi	c
0.001	Miime	10^{-3}	mili	m
0.000001	Milionime	10^{-6}	micro	μ

0.000000001	Miliardime	10^{-9}	nano	n
0.000000000001	Bilionime	10^{-12}	pico	P

Atomii excitaţi de hidrogen emit lumină roșie cu o lungime de undă de 656,28 nanometri (așa–numita linie Hα). Putem rescrie acest număr ca 656,28 miliardimi de metru, $656{,}28\times10^{-9}$ metri sau $6{,}5628\times10^{-11}$ metri.

Notes

[←1]
Vezi cartea mea *Farewell to Reality*, publicată în 2013. (*N. a.*)

[←2]

Ga = miliarde de ani, Ma = milioane de ani, ka = mii de ani în urmă; s = secunde. Pe baza recentei (21 martie 2013) estimări a vârstei universului (13,82 miliarde de ani) prin datele obținute de la satelitul Planck al Agenției Spațiale Europene.

[←3]

Ceea ce e foarte bine. Nu vreau să mă gândesc ce s-ar întâmpla dacă am putea recrea pe Pământ condițiile din timpul big bang-ului. *(N. a.).*

[←4]

„Nimic” e un concept cu puternice conotaţii filozofice, şi e mai bine să-l evităm dacă nu vrem să intrăm în dezbateri semantice. *(N. a.).*

[←5]

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus,* traducere de C.K. Ogden, Kegan Paul, Trench, Trubner & Co. Ltd., London, 1922, p. 90. [Ediția românească: traducere de Mircea Dumitru şi Mircea Flonta, Editura Humanitas, București, 2001]

[←6]

Energia cinetică a unui obiect cu masa m și viteza v este $1/2\ mv^2$.

[←7]

Relația exactă este $F = Gm_1m_2/r_2$, unde F este forța gravitațională, m_1 și m_2 sunt masele obiectului 1 și obiectului 2, iar r este distanța dintre ele. G este constanta gravitațională, o constantă empirică de proporționalitate, cu valoarea de $6{,}673\times10^{-11}$ $m^3kg^-1s^{-2}$.

[←8]

Albert Einstein, „Cum am creat teoria relativităţii”, curs ţinut la Universitatea din Kyoto, 14 decembrie 1922, tradus de Yoshimasa A. Ono, *Physics Today*, august 1982, p. 47.

[←9]
Wheeler, p. 235.

[←10]

Rezultatele observațiilor lui Eddington din 1919 n-au fost cu adevărat revelatoare (vezi Simon Singh, *Big bang,* Editura Humanitas, București, 2008), dar și el, și Einstein erau convinși de corectitudinea relativității generale. *(N. red.).*

[←11]

Aceasta are ca rezultat o deplasare a axei de rotație a giroscoapelor care, deși foarte mică, poate fi măsurată cu mare precizie. îmi amintesc că în copilărie mă jucam cu un mic giroscop. îi imprimai rotația trăgând de un fir și urmăreai ce se întâmplă (erau vremuri mai simple). Așa am descoperit precesia, deși habar n-aveam la ce mă uitam. *(N. a.).*

[←12]

Albert Einstein, *Proceedings of the Prussian Academy of Sciences*, 142 (1917). Citat în Isaacson, p. 255.

[←13]

Vom vorbi mai pe larg despre aceste dovezi în capitolul 4. (*N. a.*).

[←14]

În autobiografia sa, fizicianul teoretician de origine ucraineană George Gamow scria: „Când am discutat cu Einstein probleme de cosmologie, a recunoscut că introducerea constantei cosmologice a fost cea mai mare gafă din viața lui”. George Gamow, *My World Line: An Informal Autobiography,* Viking Press, New York, 1970, p. 149. Citat în Isaacson, pp. 355-356.

[←15]

Lemaître scria: „Lucrurile se întâmplă ca și cum energia din vid ar fi diferită de zero”. G. Lemaâtre, *Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles*, Seria A, 53, pp. 51-85. Citat în Nussbaumer și Bieri, p. 171.

[←16]

Figura 3(b) dă temperaturile măsurate în grade kelvin (K). Scala de temperatură Kelvin se obține prin adăugarea a 273 de grade la scala Celsius, astfel că punctul de îngheț al apei este la 0° C sau 273 K, iar punctul de fierbere este la 100°C sau 373 K. Zero K este „zero absolut", temperatura unui corp (ipotetic) cu energie absolut zero. *(n. a.).*

[←17]

Dacă aveţi nedumeriri privind reprezentare numerelor foarte mici sau foarte mari prin numere înmulţite cu puteri ale lui zece (ca în 4×1017), consultaţi anexa. *(n. a.).*

[←18]

Desigur, ele nu sunt culoarea și aroma pe care le cunoaștem din viața de zi cu zi. în cazul cuarcilor, ar trebui să privim culoarea și aroma cam la fel cum privim sarcina electrică. Există două tipuri de sarcină electrică: pozitivă și negativă. Există trei tipuri de culoare a curcilor (roșu, verde și albastru) și șase tipuri de arome (up, down, strange, charm, top și bottom). Am păstrat denumirile originare ale aromelor cuarcilor, folosite de regulă și în română (*n. red.).*

[←19]

În încercările de a unifica mecanica cuantică și gravitația (teoria corzilor, gravitația cuantică cu bucle) nu avem de-a face cu un „punct infinit mic”, ci cu un fel de „celulă elementară” de spațiu-timp, de dimensiune extrem de mică, dar finită. De aici ideea că ar fi putut exista un univers anterior care s-a comprimat până la acea celulă elementară, pentru ca dilatarea acesteia să dea apoi naștere universului nostru. S-au făcut chiar speculații că am putea afla anumite date despre universul anterior. Vezi Brian Greene, *Universul elegant* (Editura Humanitas, București, 2015) și Martin Bojowald, *Ce a fost înainte de big bang*? (Editura Humanitas, București, 2015). *(N. red.)*

[←20]

Scara Planck e scara de masă-energie cu ordinul de mărime de 1019 miliarde de electronvolţi, la care efectele cuantice ale gravitaţiei se presupune că sunt puternice. E caracterizată prin măsuri ale masei, lungimii şi timpului calculate pornind de la cele trei constante fundamentale ale naturii: constanta gravitaţională (G), constanta Planck *(h)* împărţită la 2π care se scrie *h* (se citeşte „h-bară") şi viteza luminii *(c)*. Masa Planck e dată de $\sqrt{he/G}$ şi are valoarea de aproximativ $1{,}2\times10^{19}$ miliarde de electrovolţi sau $1{,}2\times10^{28}$ electrovolţi. Lungimea Planck e dată de $\sqrt{Gh/3}$ şi are valoarea de aproximativ 1, 6×10-35 metri. Timpul Planck e dat de $\sqrt{Gh/c5}$ (lungimea Planck împărţită la *c*) şi are valoarea de aproximativ 5×10^{-44} secunde.

[←21]

Vezi Guth, p. 86.

[←22]

Pentru a rezolva însă problema „caracterului plat” e nevoie de presupuneri privind condițiile inițiale și durata perioadei inflaționare. O problemă e pur și simplu înlocuită cu alta. *(n.a.)*

[←23]

Se pronunţă „de Broy“. *(N. a.).*

[←24]

Louis de Broglie, din varianta reeditată în 1963 a tezei sale de doctorat. Citat în Pais, *Subtle is the Lord*, p. 436.

[←25]
Tom Stoppard, *Hapgood*, Faber and Faber, London, 1988.

[←26]

Unificarea relativităţii speciale cu teoria cuantică nu pune probleme. Lucrurile încep să se complice la unificarea teoriei cuantice de câmp relativiste cu relativitatea generală. (*N. a.*).

[←27]

Cititorii atenţi vor observa că un foton virtual deplasându-se de la electronul 1 la electronul 2 în această diagramă trebuie să călătorească înapoi în timp. Acesta e numai unul dintre numeroasele paradoxuri ale teoriei cuantice. *(N. a.*).

[←28]

În 1905, Einstein a sugerat că energia (E) unei cuante de lumină este proporţională cu frecvenţa ei (reprezentată prin litera grecească „niu”, ν), conform formulei $E=h\nu$, unde h este constanta lui Planck, cu valoarea de $6{,}626\times10^{-34}$ jouli-secunde. Acest rezultat rivalizează cu mai celebra sa ecuaţie $E = mc^2$.

[←29]

În engleză *to spin* înseamnă „a se învârti”. *(N. red.).*

[←30]

Pentru moment, afirmaţia e suficientă, dar în capitolul următor va trebui să lămuresc ce înseamnă să ai un câmp de amplitudine zero în spaţiul gol. *(N. a.)*

[←31]

Spre nemulţumirea celorlalţi, trebuie s-o spunem. *(N. a.).*

[←32]

Acesta e câmpul Higgs electro-slab. în cele ce urmează, îl voi numi simplu „câmpul Higgs“, înțelegându-se că mă refer la câmpul Higgs apărut la sfârşitul Epocii Electro-slabe. *(N. a.).*

[←33]

Comunicat de presă CERN, 14 martie 2013.

[←34]

Lederman, p. 22.

[←35]

Din păcate, Robert Brout a murit în 2011 după o lungă suferință, iar Premiul Nobel nu se acordă postum. *(N. a.).*

[←36]

Masele particulelor elementare sunt raportate de Partide Data Group și pot fi găsite online la pdg.lbl.gov. Masa electronului este de 0,510998928 MeV/c^2 (milioane de electronvolți împărțit la c^2). Masa protonului este 938,272046 MeV/c^2, deci raportul dintre masa electronului și cea a protonului este de 0,000544617.

[←37]

Când teoreticianul englez Paul Dirac a elaborat prima versiune relativistă a teoriei cuantice a electronului în 1927, a constatat că apar de două ori mai multe soluţii decât credea că e nevoie. Pe lângă două soluţii care corespund orientărilor spinului electronului, a obţinut alte două soluţii de „energie negativă", care l-au derutat până când, în 1933, a acceptat că ele corespundeau unui „nou tip de particulă, necunoscut fizicii experimentale, care are aceeaşi masă cu electronul, dar sarcină electrică opusă". Paul Dirac, *Proceedings of the Royal Society*, A133 (1931), pp. 60-72. *(n.a.)*

[←38]

Particulele neutre se consideră că sunt propriile lor antiparticule. *(n.a.).*

[←39]

Particulele cuantice au de asemenea o proprietare numită „paritate”, care poate fi înțeleasă din perspectiva ondulatorie asupra particulelor. Paritatea nu are un corespondent în lumea pe care o cunoaștem, dar e legată de momentul cinetic în interacțiunile particulelor (și îl guvernează). Particulele au paritate de „stânga” sau de „dreapta”. în mod bizar, doar particulele cu paritate de stânga și antiparticulele cu paritate de dreapta sunt afectate de forța nucleară slabă, iar nimeni nu știe de ce. *(N. a.*).

[←40]

Desigur, aceste acronime nu sunt pure coincidenţe. întâi a fost născocit WIMP [păMpălău], sursă apoi de inspiraţie pentru MACHO. *(N. a.)*

[←41]

De aici numele Marelui Accelerator de Hadroni. *(N. a.)*

[←42]

Izotopii au acelaşi număr de protoni în nucleu, dar un număr diferit de neutroni. *(N. a.).*

[←43]

ALICE vine de la A Large Ion Colider Experiment (Experiment cu un Mare Accelerator de Ioni). *(N. a.).*

[←44]

Timpul caracteristic de dezintegrare a unui neutron liber se numește „timp de viață” și are valoarea raportată de Partide Data Group de 880,0±0,9 secunde. Aceasta e durata în care se dezintegrează *1/e* din numărul inițial de neutroni, unde *e* = 2,71828 este baza logaritmilor naturali. „Timpul de înjumătățire” reprezintă durata în care se dezintegrează jumătate din neutronii inițiali, și poate fi calculat înmulțind timpul de viață cu ln(2) sau 0,69315. Prin urmare, timpul de înjumătățire este de aproximativ 610 secunde.

[←45]

Mi s-au predat aceste lecţii la sfârşitul anilor 1960, dar manualele datau cu siguranţă din anii 1950. Multe probleme începeau cu: „Un om sare pe scara unei maşini în mişcare...” *(N. a.)*

[←46]

Dacă la începutul nucleosintezei primordiale sunt 88 de protoni și 12 neutroni la fiecare 100 de nucleoni (un raport de aproximativ șapte la unu), atunci cei 12 neutroni vor fi încorporați în șase nuclee de 4He. Aceste șase nuclee de 4He au 12 protoni, lăsând liberi 76. Nucleele de 4He sunt însă de patru ori mai grele decât un proton individual (presupunând că masele protonului și neutronului sunt egale, ceea ce e aproape adevărat). Prin urmare, procentajul în termeni de masă al protonilor este de 76%, iar cel al nucleelor de 4He este de 6×4 = 24%.

[←47]

Domnul Tompkins în Țara Minunilor a apărut în 1940, iar în 1944 a urmat *Domnul Tompkins explorează atomul. (N. a.).*

[←48]

Hans Bethe, citat de Ralph Alpher și Robert Herman, *Physics Today*, august 1988, p. 28.

[←49]

Fiind prima dată în istoria universului când particulele încărcate se combină pentru a forma atomi neutri, termenul „re“-combinare e nepotrivit, dar a fost folosit de la început și, cum oamenii de știință sunt în general conservatori, termenul s-a păstrat. *(N. a.)*

[←50]

Gamow glumea spunând că încercase să-l convingă pe Herman să-şi schimbe numele în Delter. *(N. a.)*

[←51]

Regiunea infraroșie a spectrului electromagnetic se extinde de la aproximativ 700 nanometri până la 1 milimetru (sau 0,1 centimetri). Regiunea microundelor cuprinde lungimi de undă de la 1 milimetru până la 1 metru. Un cuptor cu microunde din gospodărie folosește de regulă lungimi de undă de aproximativ 122 milimetri. *(N. a.)*

[←52]

Steven Weinberg, *The First Three Minutes*, p. 131. Afirmaţia e citată adesea de fizicienii care pledează pentru teorii netestate şi în mare măsură netestabile care parazitează fizica teoretică contemporană (vezi cartea mea *Farewell to Reality).* Weinberg nu spunea că trebuie să dăm credit fiecărei speculaţii teoretice fanteziste. Cred că ne avertiza împotriva tendinţei naturale de a fi conservatori atunci când extrapolăm chiar şi teoriile îndelung testate la condiţiile extraordinare de la începutul universului.

[←53]

Robert Dicke, citat de Dennis Overbye, p. 130.

[←54]

Privind figura 14 (b), observăm că frecvența de 7,35 centimetri se află spre capătul lungimilor de undă mari ale spectrului corpului negru la 3K. (N. a.)

[←55]

Robert Dicke, citat de David Wilkinson, „Measuring the Cosmic Microwave Background Radiation", în P. James E. Peebles, Lyman A. Page, Jr. Și R. Bruce Partridge (editori), *Finding the Big Bang,* Cambridge University Press, 2009, p. 204.

[←56]

Rămâne totuşi problema determinării condiţiilor iniţiale ale inflaţiei. *(N. a.).*

[←57]

Ecuația de Broglie este $\lambda = h/p$, unde λ este lungimea de undă, h este constanta lui Planck ($6{,}626\times10^{-34}$ jouli-secunde), iar p este impulsul. Asta înseamnă că un pachet de unde cu un spectru larg de lungimi de undă ar putea avea un spectru larg de impulsuri.

[←58]

Heinsenberg a stabilit că incertitudinea poziției înmulțită cu incertitudinea impulsului trebuie să fie mai mare sau egală cu constanta lui Planck *h.*

[←59]

Cei cu înclinaţii poetice ar spune că universul *cântă. (N. a.).*

[←60]

Acestea sunt extrem de dificil de detectat, dar în martie 2014 cercetătorii care lucrau la a doua generație a unui instrument numit Imagistica de Fond a Polarizării Cosmice Extragalactice *(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization* - BICEP2) au anunțat că descoperiseră asemenea fluctuații în semnătura polarizării de tip B. Dacă ar fi fost adevărat, ar fi reprezentat o dovadă clară în favoarea cosmologiei big bang inflaționare. Din păcate, anunțul a fost prematur și a fost apoi retras. Concluzia colaborării ulterioare dintre cercetătorii de la BICEP2 și cei care lucrează la satelitul Planck al Agenției Spațiale Europene sugerează că rezultatele sunt puternic influențate de polarizarea provocată de praful interstelar. *(N. a.).*

[←61]

Numit și „avionul spion” U-2, acesta a fost folosit de Agenția Centrală de Informații a Statelor Unite în timpul războiului rece și apare în multe „incidente” din acea perioadă. Pilotul Gary Powers a fost doborât în 1960 pe când zbura cu un U-2 deasupra teritoriului sovietic. Maiorul Rudolf Anderson, care zbura tot cu un U-2, a fost doborât în 1962, în timpul crizei rachetelor din Cuba. De asemenea, trupa irlandeză de rock U2 și-a luat numele de la acest avion. *(N. a.)*

[←62]

Pe măsură ce s-au acumulat datele, valoarea a fost revizuită, în prezent fiind de 2,726 K. (N. a.*)*

[←63]

George Smoot, citat în Singh, p. 462.

[←64]

Numită după David Wilkinson, care făcuse parte din grupul lui Dicke de la Princeton, membru al echipei COBE și conducătorul echipei de proiectare pentru WMAP. A murit în 2002, după o luptă îndelungată cu cancerul. *(n.a.)*

[←65]

Vezi S. D. M. White și M. J. Rees, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 183 (1978), pp. 341-358. Vezi S. D. M. White și M. J. Rees, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* 183 (1978), pp. 341-358.

[←66]

Sfârşitul Erei întunecate e anunţat de reionizare, momentul din istoria universului când lumina ultravioletă a stelelor nou formate e suficient de intensă pentru a desprinde electroni din norii de atomi neutri de hidrogen care erau principala formă de materie barionică din momentul recombinării. Vârsta de 550 milioane de ani e dedusă din polarizarea radiaţiei cosmice de fond, conform datelor satelitului Planck, vezi http://www.esa.mt/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_first_stars_were_born_late.

[←67]

Pentru comparație, densitatea apei lichide e de aproximativ $3x10^{22}$ molecule pe centimetru cub. *(N. a.)*

[←68]
Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Hideyuki Umeda, Kazuyuki Omukai, Gen Chiaki şi Harold W. Yorke, astro-ph/1308.4456vi, 21 august 2013.

[←69]

Amintiți-vă că gazul din interiorul unei protostele conține 24% heliu în termeni de masă, deci există prin preajmă destule nuclee de ^{4}He. *(N. a.)*

Se crede că există și o a patra ramură - numită ppIV - care e mult mai rară decât cele din figura 24. *(N. a.).*

[←70]

Se crede că există şi o a patra ramură - numită ppIV - care e mult mai rară decât cele din figura 24. *(N. a.).*

[←71]

Aceste două reacţii sunt numite proces „triplu-alfa”. Nucleul de $^{4}He^{2+}$ este acea particulă alfa emisă de nucleele instabile care prezintă radioactivitatea alfa. Cele două reacţii presupun deci fuziunea a trei particule alfa într-un nucleu stabil de carbon. *(N. a.).*

[←72]

Howard E. Bond, Edmund P. Nelan, Don A. Vanden Berg, Gail H. Schaefer şi Dianne Harmer au estimat de fapt că HD 140283 are o vârstă de 14,5±0,8 miliarde de ani. Marea incertitudine a acestei măsurători (datorată în mare parte incertitudinii legată de abundența inițială a oxigenului din stea) face să nu existe neapărat o contradicție cu vârsta estimată a universului, 13,8 miliarde de ani. Vezi astro-ph/13O2.3i8ovi, 13 februarie 2013.

[←73]

Pentru materialele stelare cu temperaturi de peste 30.000 K, opacitatea este proporțională cu $T^{-3,5}$, o relație aproximativă stabilită de fizicianul olandez Henrik Kramers în 1923. Dublarea temperaturii reduce deci opacitatea protostelei cu un factor de 23,5 sau 11,3.

[←74]

Albert Einstein, scrisoare către Paul Langevin, 16 decembrie 1924. Citat în Moore, p. 187.

[←75]

Termenii de s, p, d... datează la începuturile spectroscopiei atomice, fiind prescurtări de la „sharp” (dar), „principal”, „diffuse” etc. Ei au fost folosiţi la început pentru a caracteriza liniile spectrale, iar abia apoi pentru a numi orbitalii atomici implicaţi. *(N. a.)*

[←76]

Amintiți-vă că opacitatea unei stele e invers proporţională cu temperatura - stelele reci sunt mai opace, iar stelele fierbinţi sunt mai puțin opace. *(N. a.)*

[←77]

Să presupunem că avem o lumânare calibrată să emită lumină cu o anumită luminozitate sau strălucire. Dacă o plasăm la distanţă, lumina va părea mai slabă. Putem apoi folosi măsurătorile strălucirii sale aparente pentru a calcula distanţa până la ea. *(N. a.).*

[←78]

Se estimează că diametrul Căii Lactee este între 100.000 şi 120.000 de ani-lumină. *(N. a.).*

[←79]

Legea lui Hubble poate fi exprimată ca $v = H_0 D$, unde v este viteza galaxiei, H_0 este constanta lui Hubble la un anumit moment, iar D este așa-numita „distanță corectă” a galaxiei față de Pământ, așa încât viteza ei e dată de rata de variație a acestei distanțe. Deși e numită adesea „constantă”, H_0 variază când se modifică rata de expansiune a universului. Vârsta universului poate fi totuși estimată cu aproximație la $1/H_0$. O valoare a lui H_0 de 67,8 kilometri pe megaparsec (aproximativ $2{,}2\times10^{-18}$ km pe secundă) ne dă o vârstă a universului de 45×10^{16} secunde sau 14,3 miliarde de ani.

[←80]

Cum am creat figura 32? Am pornit de la o rețea pătrată de 4×4 galaxii spirale pe o pagină de Microsoft Powerpoint. Le-am grupat, am duplicat obiectul rezultat și am mărit imaginea, păstrându-i formatul. Creșterea scării reprezintă expansiunea universului, care însă nu se aplică fiecărei galaxii în parte (galaxiile nu-și măresc vizibil dimensiunea prin expansiune). Am schimbat în gri culoarea galaxiilor inițiale și am obținut figura 30(a) suprapunând galaxiile din rândul doi, coloana doi, iar figura 30(b) suprapunând galaxiile din rândul trei, coloana patru.

[←81]

Un megaparsec reprezintă 3,26 milioane de ani-lumină sau 30,9 miliarde de miliarde de kilometri. *(N. a.).*

[←82]

Nu există deci nici o limită pentru vitezele cu care obiectele se îndepărtează, iar viteze superioare vitezei luminii sunt în principiu posibile. Poate părea absurd, dar relativitatea specială impune o viteză limită pentru obiectele care se mișcă prin spațiu, iar măsurătorile depind de starea de mișcare a observatorului. O galaxie care se îndepărtează cu o viteză mai mare decât viteza luminii nu se deplasează în mod fizic cu această viteză, așa încât relativitatea specială nu e violată. însă de când s-a emis lumina, spațiul-timp dintre galaxie și noi s-a întins, deplasând spre roșu lumina într-o măsură echivalentă cu o viteză de recesiune mai mare decât cea a luminii. *(N. a.)*

[←83]

Parametrul *z* al deplasării spre roşu depinde de viteza obiectului *v* conform ecuației $z = \sqrt{(v/c)}]/[1-(v/c)]-1$, unde e este viteza luminii. Dacă v este mult mai mic decât c, atunci $z = v/c$. Puteți verifica singuri acest lucru luând v = 0,001c. Prin urmare $z = \sqrt{(1+0,001)/(1-0,001)}-1 = 0,001$, adică v/c.

[←84]

Ecuațiile sunt $z = v/c$ și $v = H_0D$. Măsurarea deplasării spre roșu ne permite să estimăm viteza obiectului din $v = zc$. Putem estima apoi distanța corectă din $D = v/H_0$ sau $D = zc/H_0$. O deplasare spre roșu z de 0, 00333 implică o viteză de 0,00333×299,792 de kilometri pe secundă = 990 kilometri pe secundă și o distanță D de 998 kilometri pe secundă / 67,8 kilometri pe secundă pe megaparsec, deci 14,7 megaparseci (47,9 milioane de ani-lumină).

[←85]

Am menţionat mai sus că galaxia Andromeda se deplasează spre Calea Lactee cu o viteză de aproximativ 300 km/s, ceea ce înseamnă că ele se vor ciocni şi se vor contopi peste vreo 400 milioane de ani, rezultând probabil o galaxie eliptică. (*n. a.*)

[←86]

J.P. Ostriker și P.J.E. Peebles, *Astrophysical Journal,* 186 (1973), p. 467. De fapt, argumentele lor privind stabilitatea galaxiilor s-au dovedit a fi incorecte, și totuși au ajuns la concluzia corectă (Simon White, comunicare personală, 30 octombrie 2014).

[←87]

De pildă, în teoria gravitației modificate (MOG), elaborată de John W. Moffat de la Universitatea din Toronto, ecuațiile einsteiniene ale câmpului gravitațional sunt modificate așa încât gravitația să fie întărită la distanțe mari în prezența corpurilor masive. Această teorie poate explica curbele de rotație a galaxiilor fără a invoca existența materiei întunecate.

[←88]

Douglas Adams, *The Hitch Hiker's Guide to the Galaxy,* Pan Books, London, 1979, P-62.

[←89]

Când spun „azi“, mă refer la tiparele pe care le observăm azi. Luminii unei galaxii aflate la un miliard de ani-lumină i-a luat un miliard de ani ca să ajungă la noi. Această lumină ne dezvăluie deci cum arăta galaxia pe când a fost emisă, în urmă cu un miliard de ani. Cu cât e mai departe obiectul, cu atât mai departe privim înapoi în timp. *(n. a.)*.

[←90]

Aceasta ar însemna că trebuie să existe şi un *proces l*, unde „l” vine de la „lent”. Într-adevăr, neutroni liberi sunt generaţi în interiorul stelelor în cursul evoluţiei lor şi pot fi captaţi de elemente produse în miezul stelei pentru a forma izotopi mai grei. Este însă un proces mult mai lent, neutronii fiind adăugaţi pe rând, cu pauze între impacturi, pentru ca izotopii să se stabilizeze prin dezintegrări datorate forţei slabe. Cel mai greu nucleu care poate fi produs în procesul l este ^{209}Bi, un izotop stabil al bismutului. *(n.a.).*

[←91]

Merită observat că diagrama nivelelor de energie ale ipoteticei molecule He_2, formată din doi atomi de He, nu arată foarte diferit de diagrama din figura 37. Avem însă acum la dispoziție patru electroni, câte doi de la fiecare atom. Doi dintre ei intră în orbitalul de legătură, iar ceilalți doi intră în orbitalul de antilegătură, ordinul legăturii fiind doi minus doi împărțit la doi, adică zero. Nu se formează nicio legătură. He_2 nu există ca moleculă stabilă.

[←92]

De fapt, orbitalii 2s și 2p ai hidrogenului se amestecă puțin, așa încât ordinea nivelurilor moleculare de energie nu e atât de simplă pe cât am lăsat să se înțeleagă. *(n.a.).*

[←93]

Observaţi că legătura din clorura de sodiu e diferită de cea prezentată în figura 37, care este o legătură *covalentă.* Clorura de sodiu este o moleculă cu legătură *ionică.* În loc să pună în comun electronii într-unul sau mai mulţi orbitali moleculari, un electron e complet transferat de la atomul de sodiu la atomul de clor, formând ioni de Na^+ şi Cl^-, care se leagă prin atracţia electrostatică reciprocă.

[←94]

Prefixul *c* – indică o moleculă ciclică.

[←95]

O legătură dublă constă dintr-un orbital molecular σ şi un orbital molecular π, acesta din urmă rezultând din suprapunerea orbitalilor p (sau hibrizi formaţi din amestecul orbitalilor s şi p, după cum vom vedea mai jos) care sunt perpendiculari pe planul legăturii σ. O legătură triplă e formată dintr-un orbital molecular σ şi doi orbitali moleculari π. (n.a.).

[←96]

Există o mică diferență. La metan, cele patru legături C-H sunt identice, astfel că orbitalii moleculari se aranjează după o distribuție regulată, creând legături C-H-C cu unghiul de 109,5°. Perechea singuratică de electroni din molecula de amoniac nu e însă echivalentă cu cele trei legături N-H, astfel că unghiul legăturilor H-N-H e îngustat la 107° (n.a.).

[←97]

La întrunirea Societăţii Americane de Astronomie din ianuarie 2014 au fost prezentate imagini ale norilor de praf formaţi în centrul supernovei 1987A, la doar 168.000 de ani-lumină de Pământ, la marginea Nebuloasei Tarantula din Marele Nor al lui Magellan, imagini obţinute de radiotelescopul Alma din Chile. (n.a.).

[←98]

Vezi M. Nielbock, R. Launhardt, J. Steinacker, A.M. Stutz, Z. Balog, H. Beuther, *et al.,* astro-ph/i208.4512V3, 8 septembrie 2012.

[←99]

Versurile melodiei „Woodstock” a lui Joni Mitchell se pot găsi pe mai multe site-uri, printre care: http://www.songlyrics.com/joni-mitchell/woodstock-lyrics/.

[←100]

Timpul la care ajunge „privirea retrospectivă” depinde de deplasarea cosmologică spre roşu z, de constanta lui Hubble şi de parametri de densitate QM şi Qλ. Când se referă la perioade de timp îndepărtate, adesea astrofizicienii nu se exprimă în termeni de mii, milioane sau miliarde de ani, ci se raportează la z. Cred că motivul e simplu. Parametrii cosmologici s-au schimbat uşor cu fiecare satelit lansat sau transmitere a datelor, ceea ce modifică vârstele estimate, în schimb deplasările spre roşu date de măsurarea frecvenţelor luminii sunt mai stabile. Am găsit un calculator util pe site-ul lui Ned Wright: http://www.astro.ucla.edu/-wright/cosmocalc.ktml. Introducând ultimele valori ale parametrilor cosmologici poţi calcula diverse lucruri, între care vârsta pentru oricare valoare a lui z.

[←101]

Factorul de scară cosmică, notat de regulă cu *α (t),* e o măsură a dimensiunii relative a universului la momentul *t* în comparație cu cea din prezent, pentru care α (acum) = i. Poate fi determinat din deplasarea spre roșu z, conform ecuației α(f) = 1/(1 + z). O supernovă de Tipul 1a cu o deplasare spre roșu z = 1 corespunde deci unui factor de scară de 0,5 sau 50% din dimensiunea actuală a universului.

[←102]

Echipa High-z a fost anume alcătuită pentru a măsura *frânarea* universului folosind supernove de Tipul Ia, deci s-ar zice că a eșuat... *(n.a.).*

[←103]

Adam G. Reiss, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiatti, Alan Diercks, Peter M. Gamavich *et al., The Astronomical Journal,* 116, septembrie 1998, p. 1009. Italicele îmi aparţin.

[←104]

Brian Schmidt, citat în Panek, p. 240.

[←105]

De exemplu, telescopul spaţial James Webb al NASA va fi succesorul telescoapelor Hubble şi Spitzer. Planificarea lui a început în 1996, şi urmează să fie lansat în 2019. Vezi http://jwst.nasa.gov/. *(n.a.).*

[←106]

De acum înainte voi adopta o cronologie privind din prezent spre trecut, iar nu de la big bang spre prezent. *(n.a.)*

[←107]

Wasserburg a fost unul dintre cei „patru călăreți”, membri ai NASA Lunar Sample Analysis Planning Team (LSAPT), responsabili pentru consilierea privind la colectarea și analiza rocilor lunare în timpul misiunilor Apollo. Ceilalți „călăreți” erau Jim Arnold, chimist la Universitatea din San Diego, Paul Gast, geolog la Universitatea Columbia din New York și Bob Walker, de la Universitatea din Washington. *(n.a.)*

[←108]

Mineralele sunt substanţe naturale cu compoziţii chimice bine definite. Rocile sunt de regulă compuse din unul sau mai multe minerale, însă unele nu conţin niciun mineral (cărbunele e un exemplu de rocă sedimentară neminerală). *(n.a.)*

[←109]

Meteoritul e rămășița în urma impactului, înainte de impact se numește *meteoroid*, iar dacă se încălzește și emite lumină când trece prin atmosferă este *meteor. (n.a.)*

[←110]

Ernst Zinner, *Science,* 300 (2003), pp. 265-267.

[←111]

S. Mostefaoui, G. W. Lugmair, P. Hoppe, şi A. El Goresy, *Lunar and Planetary Science,* XXXIV (2003), Abstract 1585. Recent a fost anunţată o nouă măsurătoare a timpului de înjumătăţire pentru 6ofe: G. Rugel, T. Faestermann, K. Knie, G. Korschinek, M. Poutivtsev, D. Schumann *et al., Physical Review Letters,* 103 (2009), 072502.

[←112]
M. Gritschneder, D. N. C. Lin, S. D. Murray, Q.-Z. Yin, și M.-N. Gong, astrophSR/1111.00I2VI, 31 octombrie 2011.

[←113]

Emanuel Swedenborg, *The Principia*, volumul II, tradus de J. R. Rendell și Tansley, The Swedenborg Society, London, 1912, p. 183, citat în Gregory L. Baker, *The Physics Teacher,* octombrie 1983, p. 444.

[←114]

Pământul se rotește în jurul Soarelui cu o perioadă orbitală medie de 365,26 de zile și se învârte în jurul propriei axe (spin) cu o perioadă (numită siderală) de 23 de ore și 56 minute. Aceasta din urmă se măsoară în raport cu stelele din fundal, deci diferă de „ziua solară”, care durează cu 4 minute în plus, pentru a ține cont de faptul că, în timp ce se învârte în jurul axei proprii (spin), Pământul se și rotește pe orbită în jurul Soarelui. *(n.a.)*

[←115]

Momentul cinetic al unui obiect în rotație (notat de regulă cu L) se calculează înmulțind momentul de inerție (I) cu viteza unghiulară de rotație *(ω), $L = I\omega$.* Îl putem obține pe ω din perioada de rotație (*T,* timpul necesar unei rotații complete), fiindcă $\omega = 2\pi/T$ (radiani pe secundă).

Formula lui I pentru diferite sisteme fizice poate fi găsită într-un manual sau online (http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_moments_of_inertia). Pentru o masă punctiformă care se rotește în jurul unui punct central, I este egal cu masa obiectului, *m,* înmulțită cu pătratul distanței dintre obiect și centrul de rotație, r, adică $I = mr^2$. Pentru mișcările de rotație ale planetelor în jurul Soarelui avem $L = I\omega = 2\pi mr^2/T$. Putem acum căuta valorile pentru masele, razele orbitelor și perioadele de rotație ale planetelor pentru a calcula *L.* Iată ce obținem:

	Masa	Raza orbitală	Perioada orbitala	L, % din L total	
	10^{24}kg	10^6 km	Zile	10^{43}kgm^2/s	
Mercur	0,33	57,91	87,97	0,0001	0,00%
Venus	4,87	108,21	224,70	0,0018	0,06%
Pământ	5,97	149,51	365,26	0,0027	0,08%
Marte	0,64	227,94	686,97	0,0004	0,01%
Jupiter	1868,60	778,57	4332,59	1,9012	58,44%
Saturn	586,46	1433,45	10589.22	0,8145	24,04%
Uranus	86,81	876,68	30799,10	0,1696	5,21%
Neptun	102,43	4503,44	60193,03	0,2510	7,71%

La efectuarea acestor calcule trebuie să transformăm kilometri în metri şi zilele în secunde. Pentru o sferă solidă uniformă, avem *I* = (z/şjmr2, iar pentru rotaţia Soarelui în jurul propriei axe avem *L* = (471/5) /?. Introducând valorile pentru masa, raza şi perioada de rotaţie siderală a Soarelui, obţinem:

	Masa	Raza orbitală	Perioada orbitala	L, % din L total	
	10^{24}kg	10^{6} km	Zile	10^{43}kgm^2/s	
Soare	1,99x10^{6}	0,70	25,05	0,1120	3,44%

Momentul cinetic total al sistemului solar este suma acestor valori ale lui L, şi e egal cu 3,25x10^{43} kgm^2/s. Aceste calcule arată că deşi Soarele are 99% din masa totală a sistemului solar, el contribuie cu doar 3,4% la momentul cinetic total.

Ne putem întreba ce perioadă de rotaţie ar trebui să aibă Soarele pentru a contribui cu 99, 9% la momentul cinetic total. În acest caz, momentul cinetic însumat al celor opt planete (3,14x10^{43} kgm^2/s) contribuie doar cu 0, 1% la total, Soarele va avea deci *L* = 3,15x10^{46} kgm^2/s. Rearanjând ecuaţia pentru L, obţinem $T = (4\pi/5)mr^2/L$, de unde deducem că *T* trebuie să fie 77 secunde.

[←116]

Pluto a fost retrogradată în 2006 la statutul de planetă pitică de către Uniunea Astronomică Internațională, dar se poartă discuții pentru a reintra în drepturi. *(n.a.)*

[←117]

Vă amintesc că într-o diagramă Hertzsprung-Russell, temperaturile de la suprafață *scad* de la stânga la dreapta. Vezi figura 27. *(n.a.).*

[←118]

Relația dintre luminozitate și temperatura de la suprafață e dată de $L = 4\pi R^2 \sigma T^4_{ef}$, unde L este luminozitatea stelei, R este raza, T_{ef} este temperatura efectivă la suprafață, iar o este constanta Stefan-Boltzmann, o constantă de proporționalitate între energia emisă de un corp negru pe unitatea de suprafață și temperatura sa, având valoarea de aproximativ $5{,}67 \times 10^{8}$ $Wm^{-2}T^{-4}$.

[←119]

Cititorii care au văzut filmul *Skyfall,* din seria Bond, își vor aminti povestea ultimului șobolan rămas în picioare, spusă de Raoul Silva, inamicul lui Bond, jucat de Javier Bardem. *(n.a.).*

[←120]

De pildă, într-un sistem cu două corpuri, să presupunem că primul încheie patru rotații, în timp ce al doilea încheie doar una. Aceste corpuri prezintă o rezonanță orbitală de 4:1. *(n.a.).*

[←121]

Theia? Aveţi răbdare – veţi primi răspunsul în capitolul următor. *(n.a.)*

[←122]

Vezi, de exemplu, Anne M. Hofmeister și Robert E. Criss, *Planetary and Space Science,* 62 (2012), p. 111.

[←123]

Uniunea Astronomică Internațională (Internațional Astronomical Union – IAU) definește o „planetă” doar în contextul sistemului nostru solar, iar o definiție mai veche care s-ar aplica exoplanetelor e ambiguă. Voi continua deci să le numesc „exoplanete”, și nu „planete”. *(n.a.)*

[←124]

Vezi http://exoplanet.eu.

[←125]

Pentru detectarea exoplanetelor sunt folosite mai multe metode, dar cea mai răspândită este *metoda tranzitului*, care implică observarea scăderii luminozității unei stele când planeta trece prin dreptul ei. *(n.a.).*

[←126]

În februarie 2014, echipa misiunii Kepler a folosit metoda „verificării prin multiplicitate”, care a permis confirmarea a 715 noi exoplanete. În aceeaşi lună, Agenţia Spaţială Europeană a hotărât să finanţeze lansarea unui alt satelit cu un telescop la bord pentru căutarea exoplanetelor, misiunea purtând numele Plato (de la PLAnetary Transits and Oscillations of stars) şi va începe probabil în 2024. *(n.a.).*

[←127]

După titlul englezesc al poveștii *Bucle aurii și cei trei ursuleți*, în care o fetiță intră în casa unor urși și alege să folosească numai acele lucruri care i se potrivesc. *(N. red.)*

[←128]

Prin definiție, Pământul se află în zona locuibilă a Soarelui. Soarele are o luminozitate de $1L_{\odot}$, iar Pământul orbitează la o distanță de 150 milioane de kilometri sau o unitate astronomică (UA). Zonele locuibile ale stelelor cu diferite luminozități variază cu rădăcina pătrată a luminozității. O stea cu luminozitatea de 0,25 $L_{\odot}$ are o zonă locuibilă la distanța orbitală de $\sqrt{0,25} = 0,5$ UA. O stea cu 0,5 $L_{\odot}$ are o zonă locuibilă la distanța $\sqrt{0,5} = 0,71$ UA. Pentru o stea cu $2L_{\odot}$ se obține $\sqrt{2} = 1,4$ UA, pentru $4L_{\odot}$ se obține $\sqrt{4} = 2$ UA și așa mai departe.

[←129]

Vezi Erik A. Petiguraa, Andrew W. Howard și Geoffrey W. Marcya, *Proceedings of the Național Academy of Sciences,* ni (2013), p. 19273.

[←130]

Presiunea de un bar este egală cu presiunea atmosferică normală la nivelul mării. *(N. a.).*

[←131]

Conform unei ipoteze din 2004, Theia s-a format pe o orbită „troiană”, împreună cu Pământul, deplasându-se imediat înainte sau imediat în urma lui. Pe măsură ce Theia acumula masă, orbita ei era perturbată de impacturi cu planetezimale, ceea ce i-a îndreptat traiectoria spre ciocnirea cu Pământul. *(n. a.).*

[←132]

Robin M. Canup, *Icarus,* 168 (2004), p. 433.

[←133]

La o ciocnire frontală, unghiul este de 0°. *(n. a.).*

[←134]

Robin M. Canup, *Science,* 338 (2012), p. 1052.

[←135]

C. Goldblatt, K. J. Zahnle, N. H. Sleep şi E. G. Nisbet, *Solid Earth 1* (2010), p. 1.

[←136]

Din latină, însemnând „a îndepărta”. *(n. a.).*

[←137]

Matija Cuk și Sarah T. Stewart, *Science,* 338 (2012), p. 1047.

[←138]

Simon A. Wilde, John W. Valley, William H. Peckand Colin M. Graham, *Nature,* 409 (2001), p. 175. Analize ulterioare au eliminat temerea că pierderea sau migrarea atomilor de plumb din cristalele de zircon ar putea distorsiona rezultatele și duce la datări greșite. Vezi John W. Valley, Aaron J. Cavosie, Takayuki Ushikubo, David A. Reinhardt, Daniel F. Lawrence, David J. Larson *et al., Nature Geoscience,* 7 (2014), p. 219.

[←139]

S-a sugerat că bombardamentul a adus cu sine cantităţi imense de apă pe suprafaţa Pământului, sub forma gheţii conţinute în comete şi asteroizi. Dar misiunea Agenţiei Spaţiale Europene Rosetta, lansată în 2004, a arătat că apa din cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko are un raport deuteriu/hidrogen foarte ridicat, spre deosebire de apa de pe Pământ. Cometa, s-ar părea, s-a format într-o zonă îndepărtată a nebuloasei solare, deci nu e tipică pentru materialul din centura Kuiper. E posibil ca o parte din apa de pe Pământ să provină din comete şi asteroizi, dar bombardamentul n-o explică în întregime. Vezi: http//www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Thesurprisingcomet. *(n.a.).*

[←140]

Numit după un grup internațional de astronomi care au colaborat la Observatorul din Nisa, pe Coasta de Azur, în Franța. *(n.a.)*

[←141]

De pildă, raza medie a orbitei Pământului are aproximativ 150 de milioane de kilometri și o rotație completă durează puțin mai mult de 365 de zile. Pentru Marte, valorile echivalente sunt 229 de milioane de kilometri și 687 de zile. Pentru Pământ, raportul dintre cubul razei medii și pătratul perioadei este 25,05, iar pentru Marte este 25,09 miliarde de miliarde de kilometri cubici pe zi la pătrat. Valoarea echivalentă pentru Mercur este 25,09, pentru Venus 25,09, pentru Jupiter 25,14, pentru Saturn 25, 44, pentru Uranus 25,10, iar pentru Neptun 25,21.

[←142]

Vezi, de exemplu, Langmuir şi Broecker, p. 389.

[←143]

Un element destul de rar ca molibdenul e utilizat de aproximativ jumătate din formele de viață - inclusiv de noi înșine. Cei pasionați de *Ghidul autostopistului galactic* de Douglas Adams vor fi încântați să observe că acesta e elementul 42. (îi mulţumesc lui Michael Russell pentru remarcă.) *(N. a.)* [în *Ghidul autostopistului galactic,* răspunsul dat de un calculator la întrebarea ultimă privind viața, universul şi tot restul este „42“. (*N. red.*)].

[←144]

Jacques Monod, *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology,* Alfred A. Knopf, New York, 1971, p. 180.

[←145]

Christian de Duve, *Philosophical Transactions of the Royal Society* A, 369 (2011), p. 620.

[←146]

Moleculele organice mari au devenit greu de desenat, iar chimiștii au simplificat reprezentarea, fără a pierde trăsăturile importante ale structurii chimice. Cum majoritatea atomilor din substanțele organice sunt de carbon și de hidrogen, adesea nu mai sunt desenați, ci sunt impliciți în structură. De pildă, aminoacidul fenilalanină are o catenă laterală constând într-o grupare fenil. E un derivat al benzenului (C_6H_6), care formează un inel hexagonal cu legături alternative simple C-C și duble C=C, iar fiecare atom de carbon e legat de un singur atom de hidrogen. Asemenea compuși formează clasa substanțelor „aromatice", deoarece unele dintre ele prezintă mirosuri aromatice. În gruparea fenil, unul dintre atomii de hidrogen ai benzenului a fost înlocuit de gruparea $-CH_2$. Inelul benzenic e desenat ca un hexagon simplu, fiecare vârf reprezentând un atom de carbon, legăturile simple fiind redate printr-o linie, iar legăturile duble prin două linii. Atomii de hidrogen nu apar, dar cine studiază chimia știe că ei sunt acolo. Dacă aveți vreun dubiu, numărați legăturile fiecărui atom de carbon – trebuie să fie patru. Dacă apar doar două sau trei, atunci a treia și a patra sunt legături C-H. Alți atomi decât cei de carbon (de pildă, oxigenul și azotul) pot ocupa vârfurile unor asemenea structuri ciclice, iar atunci ei sunt menționați explicit.

[←147]

Charles Darwin, scrisoare către John D. Hooker, 1 februarie 1871, vezi http://www.darwinprojectac.uk/editors-blog/2o12/02/15/darwins-warm-little-pond/.

[←148]

J. Oro, A. Lazcano şi P. Ehrenfreund, în Thomas, Hicks, Chyba şi Mekay (editori.), p. 13. Vezi de asemenea C.F. Chyba şi K.P. Hand în acelaşi volum, p. 195. Aceste estimări ilustrează sensibilitatea în raport cu presupunerile privind atmosfera Pământului primitiv.

[←149]

După unele estimări recente, lumina ultravioletă a Soarelui pare să fi fost o sursă importantă de energie, cu ajutorul ei ar fi putut deci apărea substanțe organice prebiotice. *(n. a.).*

[←150]

Stanley L. Miller, *Science,* 117 (1953), p. 528.

[←151]

Amintiți-vă din capitolul precedent că o atmosferă primitivă bogată în dioxid de carbon se crede că e necesară pentru a explica paradoxul tânărului Soare palid. *(n. a.).*

[←152]

Dacă nu cumva, desigur, găsim altă cale de a le concentra. Cărămizile vieții ar putea fi concentrate, de pildă, în zgura vulcanică, unde există mici goluri (vezicule) formate de gazele dizolvate atunci când roca se afla în stare topită. *(n. a.).*

[←153]

Afirmaţia nu contrazice observarea vieţii în asemenea locuri astăzi. Organismele mai mari din apropierea fisurilor hidrotermale au nevoie de oxigen, însă cu patru miliarde de ani în urmă nu exista oxigen în oceane. *(n. a.).*

[←154]

Oceanografii devin lirici când dau nume sistemelor de izvoare: Castelul Loki, Barba lui Neptun, Turnurile Imperfecte, Ferma Animalelor, Atlantis II cel Adânc, Paturile lui Bailey şi multe altele. O bază de date a tuturor câmpurilor de izvoare, confirmate şi neconfirmate, e alimentată de InterRidge, o organizaţie internaţională nonprofit care sprijină cercetarea rifturilor medio-oceanice. Vezi http: //vents-data. interridge. org. *(n. a.).*

[←155]

Nick Lane și colegii săi de la University College din Londra au construit în laborator un asemenea „reactor al originii vieții”. Primele experimentele par promițătoare - vezi Hershy *et al., Journal of Molecular Evolution*, 79 (2014), pp. 213-227. *(n. a.).*

[←156]

Ionii de acetat care captează un proton (H^+) de la acidul acetic, CH_3CO_2H, principalul ingredient al oţetului. *(n. a.).*

[←157]

Izvoarele hidrotermale alcaline observate azi nu conţin fier în hornurile lor. *N. a.).*

[←158]

Dar Wächtershäuser se referă la un mediu de „horn negru”. *(n. a.).*

[←159]

Asta se întâmplă și în bucătărie, o spun din experiență proprie. *(n. a.).*

[←160]

Asta îmi amintește o scenă din *Life story*, filmul produs de BBC în 1988 care prezintă descoperirea structurii ADN-ului: James D. Watson (jucat de Jeff Goldblum) se joacă cu modelele moleculare ale bazelor azotate și mestecă *chewing gum* (e american și ne aflăm în 1953). Cuplează adenina cu timina (identică cu uracilul, exceptând gruparea –CH3), apoi guanina cu citozina. Le pune una peste alta și își dă seama că tiparele sunt aproape echivalente. Se oprește din mestecat. Dacă v–ați întrebat vreodată ce simți când faci o descoperire științifică, vă recomand să priviți scena. *(n.a.).*

[←161]

Francis Crick a formulat sintagma în 1958, dar n-a folosit corect cuvântul „dogmă” (o credință aflată dincolo de orice îndoială). La acea vreme existau puține dovezi în sprijinul afirmației lui Crick. El însuși recunoștea în autobiografia sa că „ipoteză* ar fi fost un cuvânt mai potrivit. Știm astăzi că ipoteza e în linii mari corectă, excepție făcând cazul retrovirusurilor, care pot transcrie informația genetică din ARN-ul lor în ADN-ul gazdei infectate. *(n. a.).*

[←162]

Nick Lane și William F. Martin, *Cell,* 151 (2012), pp. 1406-1416.

[←163]

Tot ce ține de viața celulară are nevoie de un gradient electrochimic, iar în principiu orice truc chimic folosit pentru a-l replica în interiorul unei celule primitive va fi mulțumitor, cu condiția să funcționeze bine. Ne putem imagina diferite populații de sisteme din porii hornurilor care găsesc soluții diferite, conducând la evoluția unor tipuri diferite de protoorganisme, pe care le-am putea recunoaște ca bacterii primitive sau archaea. în forma lor actuală, aceste organisme au în comun multe dintre procesele biochimice esențiale, dar au o biochimie a membranei diferită, pesemne în legătură cu diferitele soluții găsite pentru gradientul electrochimic. Vezi Sojo *et al., PLoS Biology,* 12 (2014), p. 61001926. *(n. a.).*

[←164]

De pildă, la om, până la 16 gene pot fi răspunzătoare pentru culoarea ochilor, dar cele principale sunt gena OCA_2, o secvență de aproape 350.000 de nucleotide care codifică o proteină implicată în producerea pigmentului melanină, și gena $HERC_2$. Se crede că o mutație în gena $HERC_2$ a avut loc în urmă cu 6000-10.000 de ani, afectând exprimarea genei OAC_2 și transformând ochii căprui în ochi albaștri. *(n. a.).*

[←165]

Cu excepţia ovulului şi a spermatozoizilor, celulele umane au 46 de cromozomi, formaţi din cromozomii moşteniţi de la părinţi. Celulele sexuale umane au 23 de cromozomi. *(n. a.).*

[←166]

Transferul orizontal de gene e principalul răspunzător pentru evoluția bacteriilor rezistente la antibiotice. *(n. a.).*

[←167]

Darwin, p. 484.

[←168]

Carl Woese, *Proceedings of the Național Academy of Sciences,* 95 (1998), p. 6858.

[←169]

Vezi J. Thomas Beatty, Jorg Overmann, Michael T. Lince, Ann K. Manske, Andrew S. Lang, Robert E. Blankenship *et al., Proceedings of the Național Academy of Sciences,* 102 (2005), pp. 9306-9310. Bacterii sulfuroase verzi au fost găsite în mediul unui „horn negru” de pe Riftul Pacificului de Est.

[←170]

Termen care în literatura SF desemnează modelarea geografică, atmosferică şi ecologică a unei planete asemănătoare Pământului, în vederea colonizării ei de către oameni. *(n. red.).*

[←171]

Stanley Miller, citat în Knoll, p. 88.

[←172]

Martin Brasier, Nicola Melaughlin, Owen Green și David Wacey, *Philosophical Transactions of the Royal Society* B, 361 (2006), p. 889.

[←173]

J. William Schopf, *Philosophical Transactions of the Royal Society* B, 361 (2006), p. 882.

[←174]

Abigail C. Aliwood, John P. Grotzinger, Andrew H. Knoll, Ian W. Burch, Mark S. Anderson, Max L. Coleman și Isik Kanik, *Proceedings of the Național Academy of Sciences,* 106 (2009), pp. 9548-9555. Citatul apare le p. 9555.

[←175]
David Wacey, Matt R. Kilburn, Martin Saunders, John Cliff și Martin D. Brasier, *Nature Geoscience,* 4 (2011), pp. 698-702.

[←176]

Autorii spuneau: „[...] conchidem că vechile structuri sedimentare induse microbian din Formațiunile Dresser erau dominate de microbi cu un comportament asemănător cianobacteriilor moderne.” Vezi Nora Noffke, Daniel Christian, David Wacey și Robert M. Hazen, Astr*obiology, 13* (2013), pp. 1121-1122.

[←177]
S.J. Mojzsis, G. Arrhenius, K.D. Mekeegan, T.M. Harrison, A.P. Nutman și C.R.L. Friend, *Nature,* 384 (1996), pp. 55-59.

[←178]
Yoko Ohtomo, Takeshi Kakegawa, Akizumi Ishida, Toshiro Nagase şi Minik T. Rosing, *Nature Geoscience,* 7 (2014), pp. 25-28.

[←179]

Oleg Abramov și Stephen J. Mojzsis, *Nature,* 459 (2009), pp. 419-422.

[←180]

Denumirea și datarea perioadelor geologice variază în timp sau chiar de la o publicație la alta. M-am bazat aici pe Tableul Cronostratigrafic Internațional, V2013/01, realizat de Comisia Internațională de Stratigrafie. Vezi http://www.stratigraphy.org.

[←181]

Formațiunile de fier în benzi pot fi produse și în absența oxigenului. Unele bacterii fotosintetizante folosesc fierul ca sursă de electroni, ceea ce duce la oxidarea fierului și precipitarea acestuia, cu formarea de hematit, Fe_2CO_3. *(n. a.).*

[←182]

Estimarea exactă a nivelului de oxigen atmosferic din Proterozoic e extrem de dificilă, iar aceste date ar putea fi supraestimate. *(n. a.).*

[←183]

Dacă nu cumva aveţi o maşină electrică, deşi probabil că în spatele sursei de electricitate pe care o folosiţi ca să vă încărcaţi bateria se află tot combustibilii fosili. *(n. a.).*

[←184]

Recunosc că „apelează la carbon organic dizolvat” sună mai bine decât „se hrănesc cu rămășițele descompuse ale organismelor moarte”. *(n. a.).*

[←185]

Nu e prima dată în istoria vieţii când organismele respiră. Avem tendința să privim respirația din perspectivă umană, aerobă, dar organisme microscopice respirau pesemne o gamă largă de substanţe anorganice pe tot parcursul Arhaicului, în funcţie de natura ciclului lor metabolic. Respirația anaerobă (fără oxigen) e posibilă. *(n. a.).*

[←186]

Reţineţi că fiecare celulă umană are aproximativ doi metri de ADN. *(n. a.).*

[←187]

Vezi de exemplu f. Cameron Thrash, Alex Boyd, Megan J. Huggett, Jana Grote, Paul Carini, Ryan J. Yoder *et al., Scientific Reports,* 1 (2011).

[←188]

De exemplu, Cox *et al.* Prezintă dovezi privind rolul unui tip de archaee numită Crenarchaeota (Cymon J. Cox, Peter G. Foster, Robert P. Hirt, Simon R. Harris și T. Martin Embley, *Proceedings of the Național Academy of Sciences,* 105 (2008), pp. 20356-20361). Analizele genetice ulterioare efectuate de Kelly *et aL* au arătat că strămoșul eucariotelor este un membru al încrengăturii Crenarchaeota numit Thaumarchaeota (S. Kelly, B. Wickstead și K. Gull., *Proceedings of the Royal Society B,* 29 septembrie 2010).

[←189]

Lane, *Life Ascending,* p. 112.

[←190]

Pentru studiul inițial vezi: Jochen J. Brocks, Graham A. Logan, Roger Buick și Roger E. Summons, *Science,* 285 (1999), pp. 1033-1036. Citatul e luat dintr-un articol recent: Shuhai Xiao, *Evolution from the Galapagos: Social and Ecological Interactions in the Galapagos,* volumul II (2013), p. 110.

[←191]

William Martin e însă de altă părere. El susţine, împreună cu Miklós Muller, că marea diversitate a structurilor mitocondriale observată la eucariotele din prezent poate fi explicată doar dacă *eucariotele* au apărut în condiţii predominant anaerobe. *(n. a.).*

[←192]

Fitness - în original, cu trimitere la conceptul darwinist *survival of the fittest* (supraviețuirea celui mai apt). Cum Baggott folosește limbajul darwinist la nivel genetic, am ales să traducem *fitness* prin „aptitudine”, ceea ce, într–o exprimare mai întortocheată, ar însemna „calitatea de a fi apt genetic”. *(n. red.).*

[←193]

Termenul pare să fi fost născocit de Martin Brasier - vezi *Secret Chambers*, p. 190. Brasier arată că, fără să fie lipsită de interes, e o perioadă de extraordinară stabilitate evolutivă. *(n. a.).*

[←194]

Unii geologi susţin totuşi că Pământul n-a fost complet acoperit de gheață în timpul acestor glaciațiuni, iar suprafețe întinse de ocean au rămas descoperite şi accesibile. Potrivit lor, Pământul era un „bulgăre de lapoviță”, nu un „bulgăre de zăpadă”. *(n. a.).*

[←195]
John P. Grotzinger, David A. Fike și Woodward W. Fischer, *Nature Geoscience, 4* (2011), pp. 285-292.

[←196]

Vezi Jonathan L. Payne, Alison G. Boyer, James H. Brown, Seth Finnegan, Michal Kowalewski, Richard A. Krause, Jr. *Et al., Proceedings of the Naţional Academy of Sciences,* 106 (2009), pp. 24-27, în special fig. 1, p. 25.

[←197]

Knoll, p. 164.

[←198]

Complex de ecosisteme răspândit pe un teritoriu mare. *(n. red.).*

[←199]
S. Schroder și J. P. Grotzinger, *Journal of the Geological Society, London,* 164 (2007), pp. 175-87.

[←200]

Au existat însă indicii. Paleontologul englez W. Salter a publicat în 1856 şi 1857 articole anunţând descoperirea unor fosile în rocile ediacarane din Longmynd, Shropshire, iar la acestea se referea Darwin în *Originea speciilor.* Salter credea că erau viermi marini şi trilobiţi, dar acum se pare că era vorba de structuri microbiene. Vezi Richard H. T. Callow, Duncan Meilroy şi Martin D. Brasier, *Ichnos,* 18 (2011), pp. 176-187.

[←201]

Citatul apare în Fortey, pp. 59-60 și provine din a șasea ediție a *Originii speciilor,* publicată în 1872 (citatul e la pagina 286). Prima ediție, din 1859, conține o formulare diferită: „Nu pot da un răspuns satisfăcător la întrebarea de ce nu găsim urme din aceste vaste perioade primordiale. [...] Dar e foarte greu de înțeles absența unor mari acumulări de straturi fosilifere, care după teoria mea trebuie fără îndoială să se fi adunat undeva înaintea epocii siluriene". Aceste pasaje apar la p. 307. Am făcut comparația apelând la http://darwinonline.org.uk/Variorum.

[←202]

Citatul provine din primul episod al seriei de documentare *First Life* ale lui David Attenborough, difuzat pentru prima dată în Anglia de BBC pe 5 noiembrie 2010. Într-un alt documentar, *Attenborough's Journey,* acesta spunea: „Nu-mi aduc aminte unde am auzit pentru prima dată de descoperirea lui *Chamia,* dar știu sigur că mi-am tras o palmă. M-am gândit că puteam intra în istorie. Puteam să-l descopăr. De ce n-am căutat?"

[←203]

Domenii? Regnuri? încrengături? Specii? Dacă sunteţi nedumeriţi de aceste grupuri taxonomice şi vreţi să înţelegeţi natura relaţiilor dintre ele, consultaţi nota 4 de la sfârşitul cărţii, corespunzătoare capitolului de faţă. *(n. a.).*

[←204]

Sistemul şi convenţiile folosite de biologi pentru clasificarea diferitelor forme de viaţă se numeşte taxonomic biologică. Ea îşi are originea în taxonomia concepută de marele botanist suedez Carolus Linnaeus în 1735, iar versiunea modernă este ilustrată simplificat în figura 97, care prezintă un şir de niveluri taxonomice începând cu domeniul (sunt cunoscute trei domenii: Bacteria, Archaea şi Eukarya) şi sfârşind cu specia. Faptul că avem nevoie de şase niveluri vorbeşte de la sine despre diversitatea şi complexitatea vieţii pe Pământ.

Sub domeniu există regnul. Domeniul Eukarya (domeniul tuturor formelor de viaţă bazate pe celule eucariote complexe) conţine patru regnuri – Protista (un grup foarte divers de microorganisme eucariote), Fungi, Animalia şi Plantae.

Fiecare regn are una sau mai multe încrengături, deosebite în funcţie de „planul corpului", structura la scară mare a organismului – natura şi dispunerea părţilor corpului, morfologia şi fiziologia lor. Prin secvenţiere genetică putem determina acum mai exact gradul de „înrudire" între diferitele încrengături. Uneori organisme aparent asemănătoare se dovedesc a fi foarte diferite genetic, alteori organisme care arată diferit se dovedesc a fi strâns înrudite.

Regnul Animalia conţine încrengăturile Arthropoda (insecte, păienjeni şi crustacee), Mollusca (moluşte), Porifera (spongieri), Cnidaria (meduze, corali şi anemone de mare) şi Chordata, reprezentat de toate animalele care au – printre altele – o simetrie bilaterală cu un cordon nervos dorsal gol la interior. O subîncrengătură a cordatelor sunt vertebratele: animale cu coloană vertebrală. Încrengătura Chordata e alcătuită din clasele Amphibia (broaşte şi salamandre), Reptilia (toate reptilele), Mammalia (toate mamiferele, care se disting, între altele, prin faptul că femelele posedă glande mamare) şi Aves (păsări).

În clasa Mammalia există ordinele Macroscelidea (chiţcanul-elefant), Rodentia (toate rozătoarele), Primates şi Carnivora (un grup foarte divers care include pisici, tigri, urşi, hiene, lupi şi urşi

panda – care de fapt sunt ierbivori). Ordinul Primates se împarte familiile Aotidae (maimuțe nocturne), Tarsidae (tarsierii), Hominidae (primate superioare) și Lemuridae (lemurieni). Familia Hominidae include genurile Pongo (urangutanul), Gorilla (gorilele), Pan (cimpanzeii) și Homo (oamenii), în fine, genul Homo are acum un singur reprezentant: *Homo sapiens* (numele speciilor se scrie cu italice, la început fiind trecut genul, cu majusculă).

Structura arată tare complicat, și de fapt eu am simplificat mult prezentarea ei. În anii 1950, când fizicienii au început să fie copleșiți de „fauna" particulor descoperite, iar numele acestora proliferau, Enrico Fermi i-a răspuns unui tânăr cercetăror: „Tinere, dacă aș fi putut ține minte numele tuturor acestor particule, m-aș fi făcut botanist." Enrico Fermi, citat de Helge Kragh, *Quantum Generations as 'physicsfolklore',* p. 321.) Nu vă faceți griji. Nu aveți nevoie să țineți minte toate aceste nume sau nivelurile taxonomice. Voi încerca să rămân la nivelul încrengăturii, genului și speciei.

[←205]

Vezi Fortey, p. 99.

[←206]

Knoll, p. 199.

[←207]

Îmi aduc aminte de unele ființe fantastice care apar în filmele lui Guillermo del Toro *Labirintul lui Pan* şi *Eroul scăpat din infern.* Del Toro pare să fi fost fascinat de ființe cu ochi plasaţi în locuri neobișnuite ale corpului. *(n. a.).*

[←208]

Vezi Conway Morris, *The Crucible of Creation,* capitolul 4, pp. 63-115.

[←209]

H. B. Whittington, *Philosophical Transactions of the Royal Society B,* 271 (1975), pp. 1-43. Citatul apare la p. 2.

[←210]

Darwin, p. 73.

[←211]

Baza de date a lui J.J. Sepkoski se găsește la http: //strata. Geology. Wisc. Edu/ jack/. Graficul pe care se bazează figura 80 îl găsiți tot acolo. Cititorii interesați sunt invitați să între și pe site-ul Fossilplot care, folosind baza de date a lui Sepkoski, permite construirea a diverse grafice. Site-ul e întreținut de Universitatea Statului Idaho, vezi http://geology.isu.edu/fossilplot/index.htm.

[←212]

Imaginile cu prima aselenizare se găsesc pe Youtube.

[←213]

Există totuşi dovezi privind existenţa unor eucariote nemarine vechi de 1 miliard de ani, în nord-vestul Scoţiei. Vezi Strother *et al., Nature*, 473 (2011), pp. 505-509. *(n. a.).*

[←214]

Jennifer A. Clack, *Evolution: Education & Outreach, 2* (2009), P. 222.

[←215]

E vorba de reptilele teriodonte, din care se trag mamiferele. *(n. red.).*

[←216]

Erwin, p. 58.

[←217]

Seth D. Burgess, Samuel Bowring și Shu-zhong Shen, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 10 februarie 2014.

[←218]

Am lucrat în calitate de cercetător postdoctoral la Universitatea Stanford în 1981-1982 și țin minte apusurile de soare mov provocate de praful atmosferic rezidual în urma erupției Muntelui Sf. Elena. *(n. a.).*

[←219]

Una e să dai vina pe vulcani şi alta e să explici exact ce a provocat activitatea vulcanică la o asemenea scară. Adevărul e că nu ştim, dar s-a spus că rifturile continentale ar putea fi răspunzătoare. Unii oameni de ştiinţă cred că vulcanismul a fost declanşat de ciocnirea cu un asteroid. *(n. a.).*

[←220]

Fortey, p. 235.

[←221]

Personajul Grant a fost inspirat, în parte, de paleontologul american Jack Homer, care a crescut în Montana și a găsit prima fosilă de dinozaur la vârsta de opt ani. E curator de paleontologie la Muzeul Geologic și predă la Universitatea Statului Montana, ambele în Bozeman, Montana. Homer a fost consultant la primele trei filme din serie. *(n. a.).*

[←222]

Bakker a fost sursa de inspirație pentru personajul Robert Burke (jucat de Thomas F. Duffy) din ecranizarea cărții *The Lost World.* Bakker susținuse că *T. rex* a fost prădător, Homer - că a fost necrofag. în semn de simpatie pentru Homer, regizorul Steven Spielberg a creat în film o scenă în care un *T. rex* îl mănâncă pe Burke. Bakker s-a recunoscut pe sine, dar a fost încântat și i-a spus lui Homer: „Vezi, ți-am zis eu că *T. rex* a fost vânător! „ *(n. a.).*

[←223]

Teropod înseamnă „picior de fiară”, a nu se confunda cu *terapsidele. (n. a.).*

[←224]

Pe atunci această limită geologică era între Cretacic și Terțiar, și era numită limita K-T. Terțiarul nu mai e recunoscut ca perioadă de Comisia Internațională de Stratigrafie. *(n. a.).*

[←225]

Luis W. Alvarez, *Alvarez: Adventures of a Physicist,* Basic Books, New York, 1987, p. 254.

[←226]

Concluziile generale ale lui Darwin au fost confirmate de analize genetice recente, în special cea asupra genelor răspunzătoare de forma ciocului, numite *ALX1* (ALX Homeobox Protein 1). Vezi Lamichhaney *et al., Nature,* 518 (2015), pp. 371-375. *(n. a.).*

[←227]

Vezi, de exemplu, Robin M. D. Beck, *Biological Journal of the Linnean Society,* 97(2009), pp. 1-17.

[←228]

Imagini ale acestor ființe găsiți în J.G.M. Thiewissen, Lisa Noëlle Cooper, John C. George și Sunil Bajpai, *Evolution: Education & Outreach, 2* (2009), pp. 272-288. Vezi figura 27, p. 286.

[←229]

fens L. Franzen, Philip D. Gingerich, Jorg Habersetzer, Jem H. Hurum, Wighart von Koenigswald și B. Holly Smith, *PLoS ONE,* 4 (2009), p. 65273. Citatul apare la p. 25.

[←230]

http://www.revealingthelink.com. *(n. a.).*

[←231]

Pentru o prezentare a controversei legată de fosila Ida, vezi http://sciencenordic.com/fossil-ida-%E2°/o8o°/o93-five-years.

[←232]

Planet of the Apes - titlul unui celebru film, tradus la noi prin *Planeta maimuțelor,* fiindcă în limba română nu se face deosebirea între *monkey* (maimuță mică) și *ape. (n. red.).*

[←233]

Celebru primatolog american care a studiat gorilele și a activat pentru protejarea lor. *(n. red.).*

[←234]

Jeffrey P. Demuth, Tijl de Bie, fason E. Stajich, Nello Cristianini şi Matthew W. Hahn, *PLoS One,* 1 (2006), p. 685.

[←235]

David A. Raichlen, Adam D. Gordon, William E. H. Harcourt-Smith, Adam D. Foster şi Wm. Randall Haas, *Jr., PLoS ONE,* 5 (2010), p. 69769.

[←236]

Dar știința ne rezervă mereu surprize. Unelte recent descoperite, la vest de Turkana, în Kenya, vechi de 3,3 milioane de ani, datează dinaintea celor mai vechi unelte cunoscute cu peste 700.000 de ani. Cel care le–a făurit putea să fi fost un *Australopithecus afarensis.* Vezi Harmand *et al., Nature*, 521 (2015), pp. 310–315. *(n. a.).*

[←237]

Oamenii de știință definesc ultimul set de perioade preistorice pe baza apariției și dezvoltării uneltelor de piatră, dar nu există un consens internațional privind împărțirea lor. în Europa, „Paleoliticul” („Epoca veche a pietrei”) începe în urmă cu 2,5 milioane de ani și se sfârșește în urmă cu 12.000 de ani, la începutul Holocenului. Paleoliticul Inferior ține de la 2,5 milioane de ani la 300.000 de ani în urmă, Paleoliticul Mijlociu de la 300.000 de ani la 40.000 de ani în urmă, iar Paleoliticul Superior de la 40.000 de ani la 12.000 de ani în urmă. Neoliticul („Epoca nouă a pietrei”) ține de la 12.000 la 6500-4000 de ani în urmă. *(n. a.).*

[←238]

Rudele noastre cele mai apropiate, cimpanzeii și gorilele, au 24 perechi de cromozomi, iar oamenii au 23. Se pare că, după ce ne-am separat evolutiv, doi dintre cromozomii noștri mai mici s-au contopit pentru a forma ceea ce numim cromozomul 2. *(n. a.).*

[←239]

Stringer, p. 32.

[←240]

O nouă specie umană, *Homo naledi,* a fost descoperită în 2013 într-un sistem de peșteri din Gauteng, Africa de Sud, și prezentată detaliat în septembrie 2015 de o echipă internațională de paleontologi condusă de Lee Berger. S-a crezut la început că fosilele datează de 2 milioane de ani și prezintă similarități cu *erectus.* în 2017 însă, s-a determinat că au o vechime de doar 300.000 de ani. Se pare că *Homo naledi* nu e un strămoș direct al oamenilor moderni. *(n. a.).*

[←241]

Vezi Nick Ashton, Simon G. Lewis, Isabelle De Groote, Sarah M. Duffy, Martin Bates, Richard Bates *et al., PLoS ONE,* 9 (2014), p. 688329.

[←242]

Filiația lui *Homo naledi* nu e deocamdată lămurită, dar ar trebui probabil să-l socotim a șasea specie care se suprapune. *(n. a.).*

[←243]

Trimitere la titlul romanului lui Karen Blixen (tradus în românește prin *Despărțirea de Africa*), după care s-a făcut un celebru film. *(n. red.).*

[←244]

Un studiu din mai 2013 efectuat de o echipă de la Institutul Max Planck pentru Antropologie Evoluționistă dă pentru Eva mitocondrială o vechime de 160.000 de ani. Un alt studiu publicat în august 2013 plasează vechimea ei între 99.000 și 148.000 de ani. *(n. a.).*

[←245]

Studiile genomice arată că est–asiatici posedă 1,7–2,1% ADN neandertalian, iar europenii 1,6–1,8%. Vezi Fu *et al., Nature* 514 (2014), p. 448. *(n. a.).*

[←246]

Pentru uniformitate, am ales să traducem constant *experience* prin „experiență”, deși, în contextul dat, uneori traducerea mai corectă ar fi „trăire”. *(n. red).*

[←247]

David J. Chalmers, *Journal of Consciousness Studies, 2* (1995), pp. 200-219

[←248]

Hilary Putnam, *Reason, Truth and History,* Cambridge University Press, 1981, p. 6.

[←249]

Cititorii care nu cunosc cartea lui Dennett s-ar putea întreba de ce, dacă Dennett a explicat deja conştiinţa, n-am dat aici explicaţia lui. Cei care au avut obiecţii la adresa argumentelor din cartea lui Dennett au numit-o *Consciousness Ignored (Conştiinţa ignorată)* sau *Consciousness Explained Away (Conştiinţa înlăturată prin explicaţii).* Vă invit s-o citiţi ca să vă faceţi o părere. *(n. a.).*

[←250]

Dennett, p. 37.

[←251]

Hărțile sunt aproape imagini în oglindă, dar separarea dintre senzație și răspunsul motor nu e perfectă. Cortexul motor primește și unele informații senzoriale, iar stimularea cortexului somatosenzorial poate uneori declanșa mișcări. *(n. a.).*

[←252]

Heath Robinson şi Rube Goldberg - caricaturişti ale căror desene reprezintă maşinării complicate. Frank Lloyd Wright - arhitect minimalist. *(n. red.).*

[←253]

Damasio, p. 33.

[←254]

M.S. Gazzaniga, *Cornell University Medical College Alumni Cuarterly,* 45 (1982), pp. 8-9. Citatul e reprodus în Thompson, p. 417.

[←255]

Cambridge Declaration on Consciousness, 7 iulie 2012.

[←256]

Neîncrederea lor se leagă de caracterul incomplet al dovezilor. *(n. a.).*

[←257]

Sally Mebrearty și Alison Brooks, *Journal of Human Evolution,* 39 (2000), pp. 453-563.

[←258]
M. Aubert, A. Brumm, M. Ramli, T. Sutikna, E.W. Saptomo, B. Hakim *et al., Nature,* 514 (2014), pp. 223-227.

[←259]

Philip Liebermann, *Current Anthropology,* 48 (2007), p. 44.

[←260]

Un „desen" descoperit în Peștera Gorham din Gibraltar, despre care se crede că aparține neandertalienilor, seamănă cu un joc neterminat de X și o. Paleontologul Clive Finlayson bănuiește că ar putea fi vorba de o hartă.

[←261]

Nu toți filozofii acceptă necesitatea unei acestui tip de structură complicată. De pildă, în cartea sa din 1995 *The Construction of Social Reality,* filozoful American John Searle propune o formă de *intenționalitate colectivă* - o predispoziție (întemeiată pesemne genetic) către sociabilitate. Mă gândesc la „mine", dar mă gândesc și la „noi". *(n. a.).*

[←262]

Dunbar, p. 59.

[←263]

Îngrijirile, ţinând de igienă şi toaletă, pe care şi le oferă maimuţele. *(n. red.).*

[←264]

Recensământ al populației engleze din secolul XI, comandat de Wilhelm Cuceritorul. *(n. red.).*

[←265]

Bob Hen, citat de Malcolm Gladwell, *The Tipping Point*, Abacus, 2001, p. 185.

[←266]

Dunbar, p. 310.

[←267]

Sandra Beleza, Antonio M. Santos, Brian Meevoy, Isabel Alves, Claudia Martinho, Emily Cameron *et al., Molecular Biology and Evolution*, 30 (2012), pp. 24-35.

[←268]

S-a vorbit mult despre incapacitatea teoriei corzilor de a preciza un mod unic de „compactificare“ a celor șase dimensiuni spațiale suplimentare pe care le presupune, de a le înfășura așa încât să nu le putem detecta. Cu un peisaj de 10^{500} posibilităţi şi fără vreun indiciu pentru a face alegerea, unii fizicieni au lansat ipoteza că de fapt natura n-a ales. Ei susțin că toate aceste posibilități există într-un „mutivers”, din care doar un univers - cel în care e întâmplă să ne aflăm - are condițiile inițiale și proprietățile compatibile cu viaţa. în cartea mea *Farewell to Reality* am arătat că aceasta e o perspectivă greșit orientată, leneșă și neștiințifică. *(n. a.).*

[←269]

De pildă, „ecuația Drake”, propusă în 1961 de astronomul american Frank Drake, era menită să ofere o bază de discuție la întâlnirea unui grup de oameni de știință implicați în căutarea inteligenței extraterestre (SETI). Nu e propriu–zis o ecuație matematică, ci un set de factori care, prin înmulțire, ne dau o idee privind probabilitatea existenței în Calea Lactee a civilizațiilor capabile să comunice prin unde radio. În estimările inițiale, Drake și colegii lui presupuneau că probabilitatea apariției vieții pe o planetă din zona locuibilă este de 100%. Ei presupuneau și că 100% din aceste planete vor ajunge să găzduiască viață inteligentă. *(n. a.).*

[←270]

Dacă vă nemulţumeşte faptul că ne apropiem de sfârşit tocmai când povestea devenea mai interesantă, vă atrag atenţia asupra unei abordări numită „istoria mare”, ai cărei adepţi vor să ofere o perspectivă ştiinţifică asupra istoriei de la big bang la civilizaţia modernă. E un curent reprezentat prin cărţi pasionante, cum sunt *Maps of Time* de David Christian şi *Big History: From the Big Bang to the Present* de Cynthia Stokes Brown (vezi bibliografia). Aceste cărţi sunt orientate mai mult asupra istoriei omenirii de la începutul Holocenului (acum 12.000 de ani), preistoria nonumană (de la big bang la aşezările neolitice) ocupând abia un sfert din relatare. O versiune online interactivă a acestui gen de istorie mare e oferită de Chrono Zoom Project (www.chronozoom.com), iniţiată în 2009 de Walter Alvarez şi Ronald Saekow de la Universitatea Berkeley.